

Materials Selection in Mechanical Design

全彩印刷

产品设计中的材料选择

Fourth Edition

原书第 4 版

[英] 迈克尔 F. 阿什比（Michael F. Ashby） 著
庄新村 向华 赵震 译

16 种图谱
18 种性能参数
7 种方法
48 个案例
15 种标准问题的可行解
90 个例题



附赠光盘



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

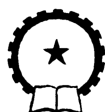
VISIT…

LANZAROTE
Caliente.COM

产品设计中的材料选择

（原书第4版）

[英] 迈克尔 F. 阿什比（Michael F. Ashby） 著
庄新村 向 华 赵 震 译



机 械 工 业 出 版 社

本书提供了材料及其工艺选择的系统方法。

全书基于独特的数据结构，详细阐释了金属材料、陶瓷和玻璃材料、复合材料、聚合物材料等多类材料构成的材料性能图表，并结合公式对材料性能进行解读，确定不同加工工艺、不同材料的选用。

全书共分 17 章，包含设计过程、工程材料及其性能、材料性能图、材料选择的基本原则与案例等基础内容，多约束与冲突目标及案例、材料与形状的组合选择及案例、杂化材料设计及案例、工艺与工艺选择等专业内容，并从材料与环境、材料与工业设计，以及革新的动力三个方面做了阐述与展望。在光盘中提供了 5 个附录，介绍了多种材料的相关数据。

读者可以从本书的案例分析开始，依据自身经验的积累，逐级提升问题的复杂程度，直至针对新的设计问题进行建模，形成新的材料指标和新的材料选用。

本书可以帮助机械设计、工业设计等设计领域的读者掌握设计过程中材料的选择原则、方法，材料的性能、材料的设计思路，使其能够在设计过程中快速找到需要的相关数据，从而确定最佳的材料选择方案。

Materials Selection in Mechanical Design, *Fourth Edition.*
Michael F. Ashby
ISBN：978-1-85617-663-7
Copyright © 2011 by Elsevier. All rights reserved.
Authorized Simplified Chinese translation edition published by the Proprietor.
Copyright © 2017 by Elsevier (Singapore) Pte Ltd and China Machine Press.
All rights reserved.
Published in China by China Machine Press under special arrangement with Elsevier (Singapore) Pte Ltd.. This edition is authorized for sale in China only, excluding Hong Kong, Macao and Taiwan. Unauthorized export of this edition is a violation of the Copyright Act. Violation of this Law is subject to Civil and Criminal Penalties.
本书简体中文版由 Elsevier (Singapore) Pte Ltd. 授予机械工业出版社在中国大陆地区（不包括香港、澳门特别行政区以及台湾地区）出版与发行。未经许可之出口，视为违反著作权法，将受法律之制裁。
本书封底贴有 Elsevier 防伪标签，无标签者不得销售。
北京市版权局著作权合同登记 图字：01-2016-7266 号。

图书在版编目（CIP）数据

产品设计中的材料选择：原书第 4 版/（英）迈克尔 F. 阿什比（Michael F. Ashby）著；庄新村，向华，赵震译. —北京：机械工业出版社，2017. 9
书名原文：Materials Selection in Mechanical Design，Fourth Edition
ISBN 978-7-111-57679-2

Ⅰ. ①产…　Ⅱ. ①迈…　②庄…　③向…　④赵…　Ⅲ. ①机械制造材料-选择　Ⅳ. ①TH14

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2017）第 191530 号

机械工业出版社（北京市百万庄大街 22 号　邮政编码 100037）
策划编辑：孔　劲　责任编辑：孔　劲　责任校对：张晓蓉
封面设计：张　静　责任印制：李　飞
北京利丰雅高长城印刷有限公司印刷
2018 年 01 月第 1 版第 1 次印刷
184mm×260mm・24 印张・613 千字
0001—3000 册
标准书号：ISBN 978-7-111-57679-2
　　　　　ISBN 978-7-89386-148-2（光盘）
定价：189.00元（含1CD）

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务	网络服务
服务咨询热线：010-88361066	机 工 官 网：www.cmpbook.com
读者购书热线：010-68326294	机 工 官 博：weibo.com/cmp1952
010-88379203	金 书 网：www.golden-book.com
封面无防伪标均为盗版	教育服务网：www.cmpedu.com

序　　言

就材料本身而言，它对于我们的生活影响甚少。然而，我们使用材料的方式却深深影响着我们的生活。

——爱比克泰德（公元 50—100 年），*Discourses*，第 2 卷第 5 章

远在爱比克泰德的时代，材料就已经对人们的生活产生了重要影响，今天则更是如此。在那个时代，可供选择的材料数量还非常有限，而今这个数量已经相当庞大。因此，由材料促发的创新机会非常多。但是，只有当我们具备一种方法，使我们能理性地从这样一份庞大的材料清单中选出合适的材料，并且了解如何成形、连接和精加工这些材料的时候，这种创新的推进才能成为可能。本书提供了一种材料及其工艺选择的系统方法，以获取最为满足设计要求的材料子集。该方法采用一种独特的信息结构，在便于数据快速访问的同时赋予用户极大的自由度以挖掘潜在的选择。目前，这种方法已被开发成相应的软件。

本书所述的方法强调面向材料的设计而非材料科学本身，尽管这些基础科学无时无刻地被用于构建相应的选择标准。阅读本书前 6 章无需很多的预备知识，对材料及力学有初步的了解即可。书中涉及形状及多目标选择的章节对专业知识的要求相对要高一些，在首次阅读时可略过。本书尽可能地将材料选择与设计的其他方面加以结合，材料选择与设计优化阶段，以及材料力学的关系自始至终贯穿于全书每一个章节。就教学而言，本书可用于面向材料设计工程领域三年级和四年级学生的课程。第 1 章～第 6 章，以及第 13 章和第 14 章可构成 6～10 个教学课时；如果设计成 20 个教学课时（含使用软件完成课程设计），则全书所有章节都将有所涉及。

本书可以成为一本具有长久价值的参考书。书中的方法、图表以及性能指标在材料及工艺选择的实际问题中均有所应用。书中的表格数据以及附录 A 和 B 中所提供的信息及解决方案，对于建模非常有帮助，是优化设计的必要组成部分。读者可以从本书的案例分析开始，依据自身经验的积累，逐级提升问题的复杂程度，直至针对新的设计问题进行建模，形成新的材料指标、罚函数和新的甚至新奇的材料选择。读者还可以通过每一章节末尾处的扩展阅读以及附录 E 给出的涉及全书所有内容的系列练习来获得进一步提升。此外，附录 A、B、C 和 D 收集了一些有用的参考资料。附录 A～E 的内容均放至随书光盘中。

与很多书籍一样，本书内容也涉及版权保护问题。通常而言，复制和分发受版权保护资料中的内容都属于侵权行为。但是，作为本书核心内容的图表，对于读者而言其最好的使用方式，是可以在这些清晰的图表上画线、尝试各种选择准则以及加以注释，等等。对于选择结论的呈现，图表标注也是最为直接有效的方式。因此，尽管本书本身受版权保护，但在注明出处的前提下，教师或读者可以无条件地复制书中的图表用以教学目的。

在本书的撰写过程中，很多同事都热情地参与讨论、评论，同时给予了很多有益的建议。在此，我要特别感谢法国格勒诺布尔大学的 Yves Brechet 教授，加州大学圣塔芭芭拉分校的 Anthony Evans 教授，哈佛大学的 John Hutchinson 教授，剑桥大学工程系的 David Cebon 教授、Norman Fleck 教授、Ken Wallace 教授、John Clarkson 教授和 Hugh Shercliff 博士，美国大学开罗分校的 Amal Esawi 教授，德雷赛尔大学的 Ulrike Wegst 教授，布里斯托大学航空工程系的 Paul Weaver 博士，以及英国剑桥卡尔迪什实验室的 Michael Brown 教授。

目录

序　言

第 1 章　绪论 …… 1

1.1　引言 …… 1

1.2　设计过程中的材料问题 …… 2

1.3　工程材料的发展 …… 3

1.4　产品中材料的演变 …… 6

1.5　本章小结 …… 8

1.6　扩展阅读 …… 8

第 2 章　设计过程 …… 11

2.1　引言 …… 11

2.2　设计过程 …… 11

2.3　设计类型 …… 14

2.4　设计工具和材料数据 …… 15

2.5　功能、材料、形状和工艺 …… 16

2.6　案例分析：开瓶器 …… 17

2.7　本章小结 …… 19

2.8　扩展阅读 …… 20

第 3 章　工程材料及其性能 …… 23

3.1　引言 …… 24

3.2　工程材料的类别 …… 24

3.3　设计所需的材料信息 …… 26

3.4　材料性能及其单位 …… 28

3.4.1　基本性能 …… 28

3.4.2　力学性能 …… 28

3.4.3　热性能 …… 35

3.4.4　电性能 …… 38

3.4.5　光性能 …… 41

3.4.6　生态性能 …… 41

3.5　本章小结 …… 41

3.6　扩展阅读 …… 41

第 4 章 材料性能图 …… 44
4.1 引言 …… 44
4.2 探究材料性能 …… 44
4.3 材料性能图 …… 47
4.3.1 弹性模量—密度图 …… 47
4.3.2 强度—密度图 …… 50
4.3.3 弹性模量—强度图 …… 51
4.3.4 比刚度—比强度图 …… 53
4.3.5 断裂韧度—弹性模量图 …… 54
4.3.6 断裂韧度—强度图 …… 55
4.3.7 损耗系数—弹性模量图 …… 57
4.3.8 导热系数—电阻率图 …… 58
4.3.9 导热系数—热扩散系数图 …… 60
4.3.10 热膨胀系数—导热系数图 …… 61
4.3.11 热膨胀系数—弹性模量图 …… 63
4.3.12 最高工作温度图 …… 64
4.3.13 摩擦和磨损 …… 65
4.3.14 成本柱状图 …… 67
4.3.15 弹性模量—相对成本图 …… 69
4.3.16 强度—相对成本图 …… 70
4.4 本章小结 …… 70
4.5 扩展阅读 …… 71
第 5 章 材料选择的基本原则 …… 73
5.1 引言 …… 73
5.2 选择方法 …… 74
5.2.1 材料属性 …… 74
5.2.2 选择策略 …… 74
5.2.3 解读 …… 77
5.2.4 筛查：属性限制 …… 78
5.2.5 排序：材料指标 …… 78
5.2.6 文档查阅 …… 79
5.2.7 现实条件 …… 80
5.3 材料指标 …… 80
5.4 选择过程 …… 86
5.4.1 解读需求，提取材料指标 …… 86
5.4.2 筛查：应用属性限制 …… 86
5.4.3 排序：图表中的材料指标 …… 87
5.4.4 文档查阅 …… 89
5.5 计算机辅助选择 …… 89

5.6 结构指标 …… 90
5.7 本章小结 …… 91
5.8 扩展阅读 …… 92

第 6 章 案例分析：材料选择 …… 93

6.1 引言 …… 93
6.2 船桨材料 …… 94
6.3 大型望远镜的反光镜 …… 96
6.4 桌腿材料 …… 99
6.5 建筑用结构材料 …… 102
6.6 飞轮材料 …… 105
6.7 弹簧材料 …… 108
6.8 弹性铰链和联轴器 …… 112
6.9 弹性填料材料 …… 114
6.10 脆性聚合物的极限变形量设计 …… 116
6.11 安全压力容器 …… 118
6.12 用于振动台的高刚性、高阻尼材料 …… 121
6.13 短时恒温容器的隔热层 …… 124
6.14 节能炉壁 …… 127
6.15 被动式太阳能供暖装置用材料 …… 129
6.16 用于精密仪器的低热变形材料 …… 132
6.17 换热器材料 …… 134
6.18 芯片散热器 …… 138
6.19 雷达天线罩材料 …… 140
6.20 本章小结 …… 143
6.21 扩展阅读 …… 143

第 7 章 多约束与冲突目标 …… 145

7.1 引言 …… 145
7.2 多约束情况下的选择 …… 146
7.3 冲突目标 …… 149
7.4 本章小结 …… 155
7.5 附录：权重因子和模糊方法 …… 156
7.6 扩展阅读 …… 158

第 8 章 案例分析：多约束与冲突目标 …… 161

8.1 引言 …… 161
8.2 多约束：轻质压力容器 …… 162
8.3 多约束：高性能发动机连杆 …… 164
8.4 多约束：高强磁场线圈 …… 167
8.5 冲突目标：桌腿 …… 171
8.6 冲突目标：必备电子产品的超薄外壳 …… 173

8.7 冲突目标：制动钳材料 …… 176
8.8 本章小结 …… 178
第 9 章 材料与形状的组合选择 …… 179
9.1 引言 …… 179
9.2 形状因数 …… 181
9.3 形状效率的限制条件 …… 189
9.4 材料—形状的最佳组合 …… 192
9.5 考虑形状因数的材料指标 …… 195
9.6 基于指标的图表选择法 …… 198
9.7 结构材料：微观形状 …… 200
9.8 本章小结 …… 203
9.9 扩展阅读 …… 204
第 10 章 案例分析：材料与形状 …… 205
10.1 引言 …… 205
10.2 人力飞机翼梁 …… 206
10.3 竞赛用自行车前叉 …… 209
10.4 楼板搁栅：木材、竹子还是钢? …… 212
10.5 再论桌腿：细和轻哪个更重要? …… 214
10.6 钢板刚度的增加 …… 215
10.7 弯曲形状：片式和股式 …… 217
10.8 超高效弹簧 …… 218
10.9 本章小结 …… 221
第 11 章 杂化材料设计 …… 223
11.1 引言 …… 223
11.2 材料性能空间中的空缺 …… 225
11.3 设计方法：A+B+构型+尺寸 …… 227
11.4 复合材料 …… 228
11.5 夹层结构 …… 236
11.5.1 借助试验确定结构材料的等效性能 …… 237
11.5.2 基于分析的夹层结构的等效性能 …… 238
11.6 多孔结构：泡沫和晶格 …… 244
11.6.1 泡沫：弯曲主导型结构 …… 245
11.6.2 晶格：拉伸主导型结构 …… 248
11.7 分段结构 …… 251
11.8 本章小结 …… 253
11.9 扩展阅读 …… 254
第 12 章 案例分析：混合物 …… 257
12.1 引言 …… 257
12.2 金属基复合物设计 …… 257

12.3 软导体和渗流 …… 259
12.4 热传导与电传导的极端组合 …… 261
12.5 冰箱内壁 …… 263
12.6 微波透射屏蔽罩材料 …… 265
12.7 握力不会减小的连接器 …… 266
12.8 各向异性的应用：散热面 …… 268
12.9 天然材料的机械效率 …… 270
12.10 扩展阅读 …… 275
第 13 章 工艺与工艺选择 …… 277
13.1 引言 …… 277
13.2 工艺分类 …… 278
13.3 成形、连接和精饰工艺 …… 281
13.3.1 成形工艺 …… 281
13.3.2 连接工艺 …… 289
13.3.3 精饰工艺 …… 290
13.4 工艺对性能的影响 …… 292
13.5 系统的工艺选择 …… 295
13.5.1 选择策略 …… 295
13.5.2 执行策略 …… 296
13.6 排序：工艺成本 …… 306
13.7 计算机辅助工艺选择 …… 310
13.8 本章小结 …… 311
13.9 扩展阅读 …… 312
第 14 章 案例分析：工艺选择 …… 315
14.1 引言 …… 315
14.2 铝合金连杆铸造 …… 316
14.3 风扇成形 …… 318
14.4 火花塞绝缘体 …… 326
14.5 歧管管套 …… 328
14.6 钢制散热器的连接 …… 329
14.7 球轴承内、外圈的表面硬化 …… 331
14.8 本章小结 …… 332
第 15 章 材料与环境 …… 333
15.1 引言 …… 333
15.2 材料生命周期 …… 334
15.3 材料与能量的消耗系统 …… 335
15.4 材料的生态性能 …… 337
15.4.1 材料生产：能量和排放 …… 337
15.4.2 材料加工能量的评估（总转化效率 15%） …… 338

15.4.3 生命周期终结 …… 339
15.5 生态选择 …… 340
15.6 案例分析：饮料瓶和防撞护栏 …… 344
15.6.1 饮料瓶 …… 344
15.6.2 防撞护栏 …… 345
15.7 本章小结 …… 347
15.8 扩展阅读 …… 348
第 16 章 材料与工业设计 …… 351
16.1 引言 …… 351
16.2 需求金字塔 …… 352
16.3 产品特性 …… 353
16.4 利用材料与工艺创造产品个性 …… 355
16.4.1 材料和感官：美学属性 …… 355
16.4.2 材料和心理：关联与感知 …… 359
16.5 本章小结 …… 362
16.6 扩展阅读 …… 362
第 17 章 革新的动力 …… 365
17.1 引言 …… 365
17.2 市场拉动与科学推动 …… 366
17.2.1 来自市场的动力和竞争 …… 366
17.2.2 新的科学点：好奇心驱动的研究 …… 369
17.3 人口与财富的增长和市场饱和 …… 370
17.4 产品责任和服务提供 …… 371
17.5 小型化和多功能化 …… 371
17.6 关注环境与个人 …… 372
17.7 本章小结 …… 374
17.8 扩展阅读 …… 374

绪　论

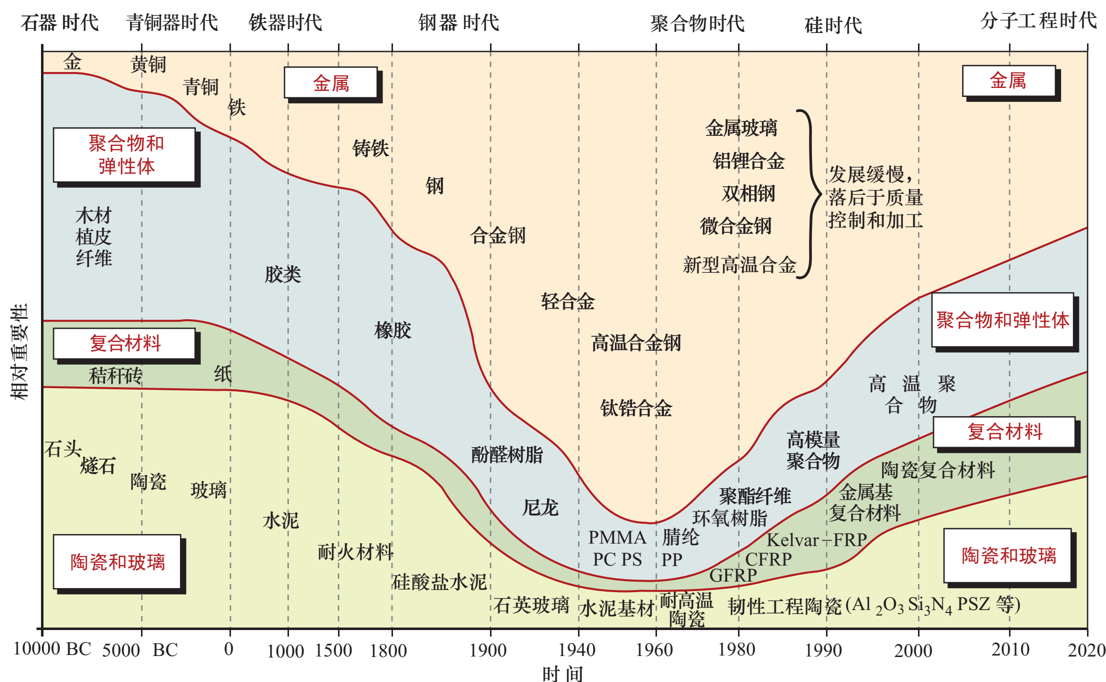


图 1.0　材料发展及其各阶段图解

随着时间的推移，工程材料在不断地进行演化。对于各种工程材料的“相对重要性”，本书的主要依据来源于“扩展阅读”中列举书籍所提供的信息。从 1960 年开始，又增加了英国和美国大学对各类材料分配的教学时间作为依据之一。对于 2020 年的预测，则依赖于汽车及飞机制造商对材料应用的评估。从时间尺度上看，整个演化过程是非线性的。现如今工程材料的发展比以往任何时候都要迅速。

1.1　引言

设计，对于不同的人而言，其含义不尽相同。凡是制造出来的东西，无论是充满诗意的女士帽子，还是充满油污的齿轮箱，在某种程度上都可以称为设计，且可以意味更多。有人认为大自然是上帝设计的，也有人认为它是自然形成的。对于读者而言，缩小领域范畴是非常有必要的。

本书主要涉及机械设计领域及材料在其中的作用。机械部件种类繁多，用途广泛，有的承载，有的导电、导热，有的直接暴露在磨损或腐蚀环境中。它们通常由一种或多种材料构成，具有一定的形状，且必须加以制造。本书主要描述这些行为之间的相关性。

从人类开始制衣、建造房屋到发动战争，对材料就有了一定的设计。现今更是如此，材料及其成形工艺的发展速度比历史上任何时期都要迅猛，所以相应的机遇和挑战也更大。本书寄望于提供一种方法来帮助读者面对挑战并抓住机遇。

1.2 设计过程中的材料问题

设计是把新想法或者市场需求转化为产品制造所需具体信息的过程。设计的每一个阶段都需要明确产品所要采用的材料以及加工工艺。通常情况下，设计主导了材料的选择，但有时候，新材料的出现又催生了新产品的研发或者是已有产品的变革。

工程师可选的材料种类非常多，至少有 160000 种。尽管标准化试图缩小可供选择的材料数量，但是新材料的不断涌现，使得选择又进一步增多。那么，工程师如何从如此众多的材料中选出最合适的材料呢？是依靠积累的经验吗？以前确实是如此，工程师将宝贵的经验传给徒弟，多年以后，又由徒弟来担当这样一个内部材料专家的角色。

经验的价值毋庸置疑，但是工程领域发生的很多变化使得这种模式不再那么行之有效。学徒式的学习方式需要花费相当长的时间。就业流动性和随之产生的专家的不稳定性以及材料信息的飞速发展，都使得基于经验的决策已无法适应如今计算机辅助设计的时代要求。因此，我们迫切需要一个系统方法——能快速消化吸收专家经验、能做出正确的决策、能在计算机上运行，并且能与其他工程设计工具相兼容。

材料的选择不能孤立于材料成形、连接以及精饰所需工艺的选择而独立进行。就成本而言，不仅包含材料本身，同时还包含材料的处理工艺，以及材料使用对我们生存环境的影响。不得不承认，仅仅是好的工程设计并不足以扩大产品的市场份额。从家用电器到汽车、航空领域，基本上所有商品，其款式、质地、手感、颜色、外观、产品的内涵，以及消费者的满意度，都十分重要。这就是我们常说的工业设计，如果忽视了工业设计，也就失去了市场竞争力。好的设计能有效发挥作用，而优秀的设计甚至能带来愉悦。

设计无极限，没有唯一或者说“正确的”解决方案，尽管有些方案会明显好于其他的方案。它们不同于机械力学、结构力学或者热力学教学中所涉及的解析问题，那类问题往往具有唯一的正确的答案。所以，设计者首先要思路开阔，考虑各种可能性。然而，一网捞众鱼，我们需借助一种手段从众多好的方案中选出最合适的方案。

本书主要针对设计过程中的材料问题，提供一套合理的方法，用于指导设计者如何面对林林总总复杂的选择。通过在“材料和工艺选择图”上引入材料及工艺属性的概念，能够显示出材料的重要信息，有助于简化潜在备选材料的搜索过程。实际的设计过程常常存在一些相互矛盾的目标，比如要求质量最轻的同时，还要成本最低，这时就要采用权衡利弊的方法。材料和形状的相互影响就是该方法的重要组成部分。综合考虑，通过两种甚至多种材料、形状以及独特的属性配置组合，可以实现原本材料

所不具备的性能。然而，如果没有材料性能及工艺属性的相关数据，上述工作也就无从谈起。因此，本书将详细介绍如何来寻找这些数据。此外，本书还将阐述美学在工程设计中的作用，以及改善材料的动力因素，其中大部分驱动力都与环境问题相关。附录提供了一些额外的有用信息。

上述方法的内涵使之易于以计算机辅助工具的形式存在，本书的大多数案例和图表正是基于 CES Edu 这样一款材料选择平台来实现的。这类工具通常与计算机辅助设计、有限元分析、优化程序以及产品数据管理等软件具有良好的接口。

上述内容会在后续章节中加以详述，并给出专题应用。接下来，我们先看一下材料的发展历程。

1.3 工程材料的发展

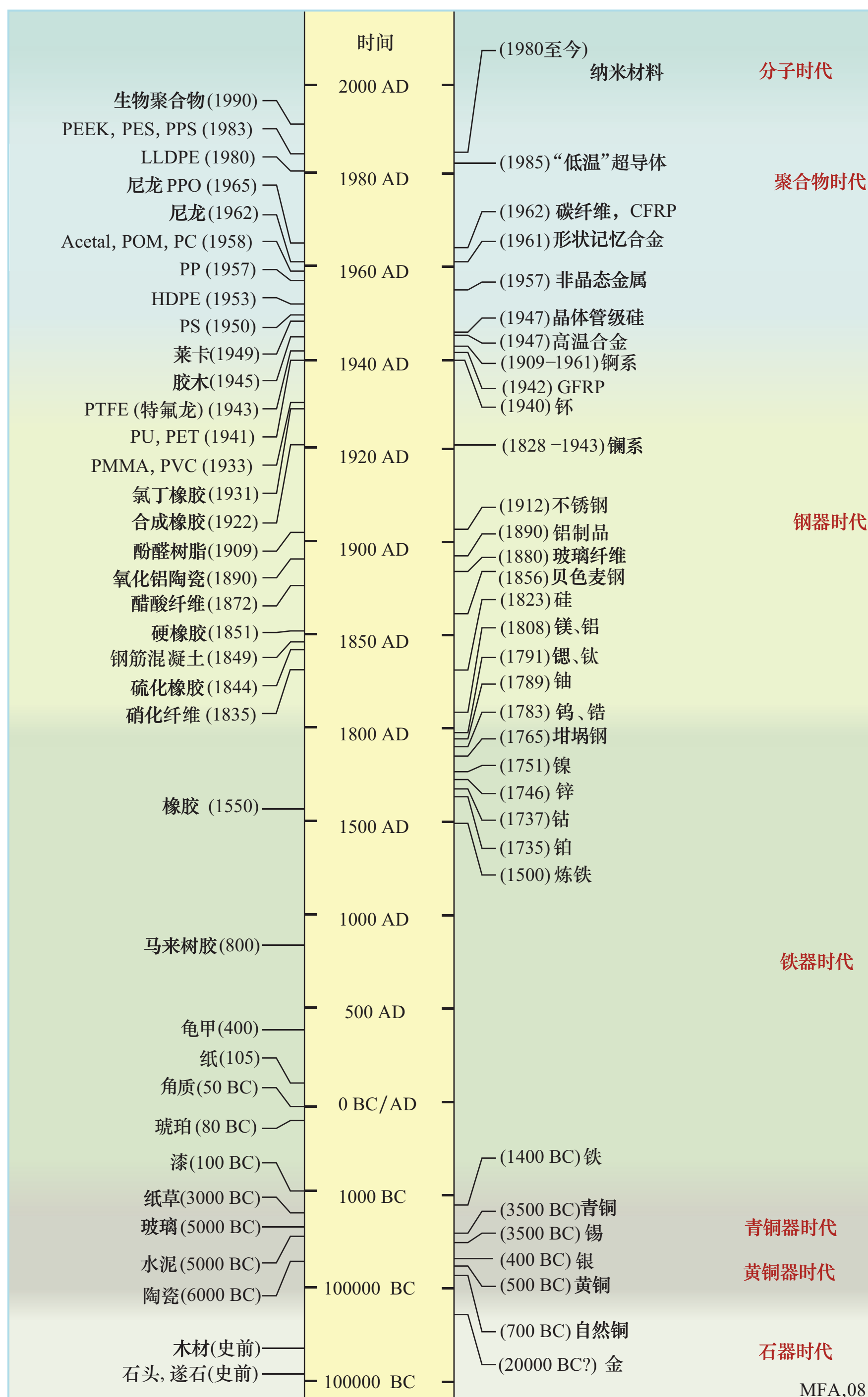
纵观整个历史长河，材料只经历了有限的设计。人类以其所使用的材料来命名相应的时代，如石器时代、青铜器时代、铁器时代。当某人死后，他所珍爱的物件将为其陪葬，如古埃及法老图坦卡蒙死后葬在彩绘的石棺中，迈锡尼国王阿伽门农用青铜剑和金面具陪葬，海盗首领与船同葬。每件珍品都代表了他们那个时代的最高科技。

如果这些人生活在今天，那他们死后会用什么陪葬呢？钛合金的手表、碳纤维强化的网球拍、金属基复合材料的山地自行车、记忆合金的眼镜框以及人造金刚石镀层的镜片、聚乙烯酮防护头盔，还是碳纳米管强化的 iPod？这不再是一种材料的时代，而是一个有着成千上万种材料的时代，是一个迄今为止材料发展速度最快的时代，更是一个材料性能发生翻天覆地变化的时代。材料种类的扩充异常迅速，以至于对于 20 年前大学毕业的设计者来说，不知道许多新材料的存在变得无可厚非。但对于一个设计师来说，这方面的无知无疑是致命的。创新设计通常意味着对新材料或者改进材料的特性的创新应用。对于任何人来说，不去求知就意味着错过这个时代的最大发展之一，即先进材料的时代。

图 1.0 为材料发展及其各个阶段的图解，图 1.1 展示了许多细节。史前时代（公元前 10000 以前，石器时代）的材料主要是陶瓷、玻璃、天然聚合物和复合材料。武器作为一种高科技产品，由木材和火石制成，而桥梁和房屋的原材料是石头和木材。少数地区可以找到自然出现的金和银。由于稀少，它们作为货币有着巨大的影响力，然而对于技术发展的作用很小。基础热化学的发展催生了金属的提炼，首先是铜和青铜，随后是铁。在公元前 4000 年到公元前 1000 年的青铜器时代，以及公元前 1000 年到公元 1620 年的铁器时代，科技得到了迅猛发展。1620 年，铸铁技术的出现，确立了金属在工程材料中的主导地位，也就是从那时候开始，钢铁（始于 1850 年）、轻合金（1940 年）和特种合金逐步发展起来。到 20 世纪 50 年代，“工程材料”即特指“金属”。工程师们主要学习冶金学课程，很少再提到其他材料。

当然，其他种类的材料也一直在发展，例如改良的水泥、耐火材料以及玻璃，橡胶、人造树胶和聚合物中的聚乙烯，但是它们在整个材料市场中的份额很小。从 1950 年起，整个材料领域发生了巨大的变化。一方面新合金的发展速度有所减缓，这与一些国家对于钢和铸铁的需求降低息息相关。另一方面，聚合物和复合材料工业迅速发展，从新型高性能陶瓷产量的预测就可以发现这种持续的扩张趋势。

在图 1.1 所示的时间轴上，材料发展的原动力就是对材料更高性能的追求，这可以从“材料性能表”中性能的不断改进体现出来。图 1.2 显示了一种“材料性能表”，



注：BC——公元前，AD——公元。

图 1.1 材料大事件年表

注：时间刻度是非线性的，底部时间跨度较大，顶部时间跨度较小。标星号（*）的年份表示发现了新元素，没标星号（*）的年份表示材料已进入应用阶段。

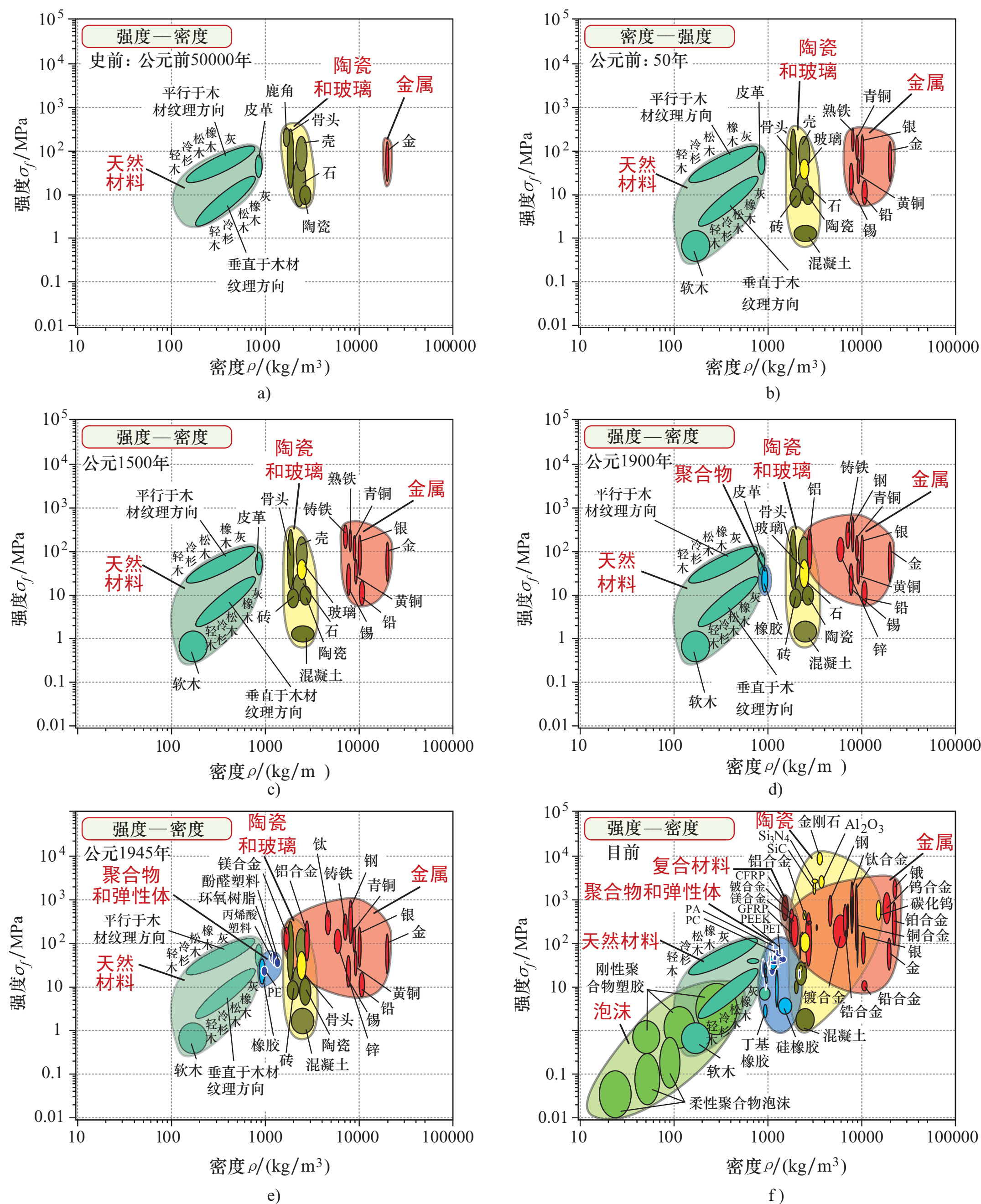


图 1.2 各类材料随着时间推移（图左上角给出了时间）在材料性能空间中的覆盖区域变化
（体现了材料不断满足强度和密度要求的发展历程，以及同一时段不同材料的覆盖区域。）

注：图中材料的简称详见表 4.1。

a）史前：公元前 50000 年　b）公元前 50 年　c）公元 1500 年　d）公元 1900 年　e）公元 1945 年　f）目前

即“强度—密度表”。图中，椭圆形泡影代表材料强度和密度的变化范围，同一类材料被归在相对较大的彩色外壳内。整个图表基于直到目前为止的六个连续的历史时刻点绘制而成。从图 1.2a 可以看出，史前材料仅仅占据强度—密度空间的很小一部分，而

在图 1.2b 所示的公元前 50 年左右，即罗马帝国的鼎盛时期，金属所占的区间迅速增大，从而使罗马人在武器和防御上具有得天独厚的优势。自那以后，金属的发展速度相对开始缓慢。尽管当时铸铁已开始出现，但历时 1500 多年的发展，“强度-密度表”仍未发生显著变化（见图 1.2c）。甚至又过了 500 年（见图 1.2d），表中各区域的扩张仍旧很小，只有铝合金有了初步的发展。随后，材料发展加速进行。到 1945 年，金属所占的区间得到显著的扩大，且出现了一种新的材料种类——人工合成聚合物开始占据重要位置。直至今天，这种新的材料种类所占据区间的扩张仍是相当引人注目的。但是，这类材料现在也已遭遇一些发展的瓶颈。

材料性能空间的任何一个切片都能展示出类似的发展历程。那么，怎样才能进一步扩大填充区域呢？如果做到了，我们又能得到什么？这些问题将会在第 13 章和第 14 章进行详细解答。现在，我们来看一看材料的发展是如何被引入产品中的，以此来结束本章。

1.4 产品中材料的演变

本节介绍了四个关于材料应用方式改变的实例，每个实例的时间跨度大约为 100 年——比人类寿命长不了多少。但请铭记，在史前时代，材料的变化远比现在慢得多。马车已拥有 2000 年的历史，而汽车的出现才仅仅是 100 多年。

壶是最古老的家用器具，比任何其他家用器具都更为普及。有证据表明（未完全证实），4000 多年前就已经有了壶。早期的壶直接通过火焰加热，是由传热好且耐明火的材料，如铁、铜、青铜（见图 1.3）所制成。1890 年发展起来的电水壶，以外部加热装置取代火焰加热，整体和先前的水壶很相像。1922 年斯旺公司做了进一步改进，将加热元件密封在金属管内置于盛水容器内部。这样，壶身不再需要传热。实际上，为了安全起见和使用简便，壶身最好由绝热绝缘材料制成。现在，大多数壶都由塑料制成，既可以自由地选择样式和颜色，又能最大限度地降低成本。



图 1.3 茶壶（分别为铸铁、青铜、聚丙烯材料）

“打扫和除尘是对健康危害极大的工作。灰尘从地板上扬起来，混入空气中，再被人呼吸到体内。因此，现实生活中最好对灰尘置之不理。”

上面这段话是 100 年前一个医生所写。超过以往任何一代人，维多利亚时代以及其同时代的其他国家的人都担心过灰尘问题。他们确信灰尘携带病菌，除尘只是分散灰尘罢了，正如医生所说，除尘之后灰尘更具感染性。在上述背景下，如图 1.4 所示的真空吸尘器应运而生。

最初的真空吸尘器是靠人力驱动的。按照今天的标准，当时的材料相当原始。吸

尘器基本上完全取材于木材、帆布、皮革和橡胶等天然材料，唯一的金属部分是连接风箱（软铁）的带和安装过滤器的箱体（中碳钢板，轧制后做成气缸）。这充分反映了那个年代材料的使用情况。即便是汽车，在1900年时也基本上由木材、皮革和橡胶构成，只有发动机和传动装置由金属制成。



a) b) c)

图 1.4 真空吸尘器

a）1880年的手动吸尘器 b）1960年伊莱克斯圆筒吸尘器

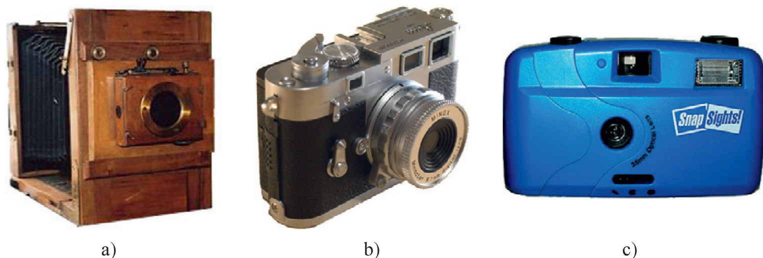
c）2010年戴森公司离心式吸尘器

（来源：感谢伍斯特新闻提供的早期吸尘器的图片（左））

电动真空吸尘器出现于1908年左右，直到1950年，这个设计才转变为圆筒式吸尘器。空气在电风扇的驱动下轴向流动流经过滤器。当然，设计的重要突破在于电动空气泵的引入。此外，该吸尘器基本上由金属组成——容器、后盖、通道，甚至吸尘的管道都是由软钢构成的。金属完全取代了天然材料。

新材料的创新性使用，带动了吸尘器的迅速发展。动力和空气流动速率大大增加，且灰尘分离方式也由过滤式变为离心式。这归功于电动机中使用的强磁性材料所带来的大功率密度。整个外壳完全是聚合物，且为了快速装配大量采用按钮连接方式。整个产品基本上看不到金属材料，甚至是吸管的直筒部分，也由金属换成了聚丙烯。

照相机光学原理的发现要比照相机（见图1.5）的应用早得多。之所以望远镜（伽利略，1600年）或者显微镜（胡克，1665年）的应用比照相机早几个世纪，主要是因为记录图像的技术始终未能突破。直至1814年，该技术才由 Joseph Nicephore Niepce 实现。早期的照相机的外壳是木板，由木匠做成，再装上玻璃镜头。后来，借助钟表业的相关技术，照相机上又被添加了金属光圈和快门。



a) b) c)

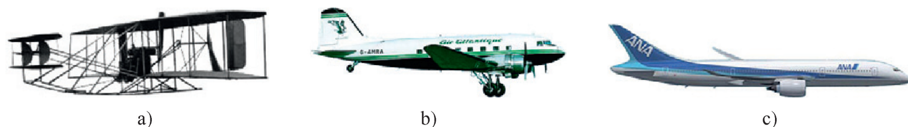
图 1.5 不同时期的照相机

a）1900年的木板照相机 b）1960年的莱卡照相机 c）2006年的塑料照相机

在随后的90年里，摄影只限于一些专业人士。1900年前后，赛璐珞胶片电影和箱式照相机的发明使得摄影由专业人士转向了大众市场，同时出现了照相机制造商之间抢占市场份额的情况。木材、帆布和皮革（配有必要的黄铜和钢）很快被精密设计的钢质机身和控制机构所取代。从1960年起，照相机的材料又被轻质耐用和性能优良的铝合金、镁合金或钛合金所取代。后来，数字化技术使得市场进一步细分。如今的高档相机往往配有复合透镜，借助科学仪器的高精度和电子精密度，其玻璃的折射率可定制。另一方面，“傻瓜”相机的外壳一般采用聚丙烯或ABS材料，且有机玻璃或树

脂镜片即能满足需求。

材料利用方式变化最大的可能要数飞机的机身了。早期的飞机由低密度的木材(云杉、巴尔沙木和胶合板)、钢丝和蚕丝构成。直到20世纪，木材还是飞机结构的主体材料。但随着飞机体型越来越大，这种材料变得越来越不适用。由此，以 Douglas DC3 为典型代表的铝合金机身应运而生，既可以满足轻量化要求，又具有较高的抗弯刚度和强度。整个20世纪，铝合金一直占据着民用客机结构材料的统治地位。20世纪末，随着提高能源利用率和降低碳排放压力的不断增加，复合材料逐步得到人们的青睐，尽管其成本较高且对加工技术提出了更高的挑战。未来的机身，以波音787梦幻客机（80%是强化碳纤维）为例，每个座位比其他同类飞机轻30%（见图1.6)。



a) b) c)

图1.6 不同时期的飞机

a）1903年莱特兄弟的双翼飞机 b）1935年道格拉斯 DC3 c）2010年波音787梦幻客机

上述事例都发生在近百年的时间内。不论从工程角度还是从美学角度，新材料的创新性应用和特性的巧妙利用对于有竞争力的设计都是至关重要的。很多水壶、吸尘器和照相机制造商失于创新，现在已从市场的竞争中销声匿迹。带着居安思危的意识，让我们进入下一章的学习，重点讨论前人们所忽略的：在设计中材料的最佳应用。

1.5 本章小结

我们需要学习什么？材料发展及其在产品中的应用方式都在发生着翻天覆地的变化，其驱动力之一就是性能。铁器时代的铁质武器取代青铜武器，20世纪的铝合金取代木材成为飞机框架主材料，都是源于对新材料更高性能的需求。但是性能并非唯一的决定因素。

经济发展发挥着强有力的推动作用：水壶、真空吸尘器以及廉价照相机中聚合物得以广泛应用，是因为聚合物易于成型复杂形状。其他领域的技术变革，如数字图像技术，促使材料的选择方式也发生着转变。在后续章节中，还有很多导致这类转变的因素，包括环境因素、限制性法规和指令、美学思想以及个人喜好。

工程材料正在快速发展，选择面比以往任何时候都宽。新材料产品迅速占领市场的典型案例非常普遍，如塑料瓶、铝合金易拉罐、聚丙烯眼镜片以及碳纤维高尔夫球杆等的迅速普及一样。在设计的早期或二次设计阶段，尽可能将所有可能的材料考虑在内是非常重要的，不能仅仅因为不熟悉而放弃使用某种材料。这就是本书所要讨论的内容。

1.6 扩展阅读

1. 材料的历史和演化

1）Singer, C. et al. （1954—2001）. *A history of technology* （21 volumes）. Oxford University Press, ISSN 0307-5451.

技术方面（包括材料）的短文汇编。

2）Delmonte，J. （1985）. *Origins of materials and processes*. Technomic Publishing Company，ISBN 87762-420-8.

关于材料被谁首次应用方面的信息纲要。

3）Dowson，D. （1998）. *History of tribology*. Professional Engineering Publishing Ltd. ，ISBN 1-86058-070-X.

一项里程碑式的工作，详细描述了摩擦磨损对设备的限制，并且给出了对于这些现象的理解。

4）Emsley，J. （1998）. *Molecules at an exhibition*. Oxford University Press，ISBN 0-19-286206-5.

最好的大众科学书籍：易懂、准确、简单且清晰。这是该领域最为杰出的一本书。所传递的信息包括：分子（通常指材料）影响着我们的健康、我们的生活以及我们所制作和使用的东西。

5）Michaelis，R. R. （Ed.）. （1992）. Gold：Art，science and technology，and focus on gold. *Interdisciplinary Science Reviews* 17（3，4），ISSN 0308-0188.

全面综述了金的历史、神秘性、关联性和用途。

6）*The Encyclopaedia Britannica*，11th Edition（1910）. The Encyclopaedia Britannica Commpany.

鉴赏家们会告诉你，不列颠百科全书在其第 11 版时达到了巅峰，尽管随后的版本依然有用。

7）Tylecoate，R. F. （1992）. *A history of metallurgy*（2nd ed.）. The Institute of Materials，ISBN 0-904357-066.

一门潜心研究的课程，关于公元前 6000 年到 1976 年金属提炼及用途的历史，由极具辩论才能且酷爱细节的作者来讲授。

2. 真空吸尘器

Forty，A. （1986）. *Objects of desire—Design in society since* 1750. Thames and Hudson，ISBN 0-500-27412-6. p. 174 et seq.

一份关于印花布、国货、办公设备以及运输系统的令人耳目一新的调研表。本书对设计者不吝赞美这词，并且关注工业设计做了什么，而不是谁做了什么。黑白图稍令人失望，这些图大部分是 19 世纪末期或 20 世纪初期绘制，缺少现代风格设计。

3. 陶瓷

Rosenblum，N. （1989）. A *world history of photograplhy*（2nd ed.）. Abbeville Press，The University of Michigan，ISBN 1-9-781-558-59054-0.

关于录像历史（从显像器到最新的计算机技术）的一份学习报告，包含美学、文档查阅、商业以及技术方面的讨论。

4. 飞行器

Grant. R. G. （2007）. *Flight*，*the complete history*. Dorling Kindersley Ltd. ISBN 978-1-4053-1768-9.

丰富的历史展示，特别是在早期飞行器材料方面。

第2章

设计过程



图2.0 开瓶器（感谢俄亥俄州阿克伦城 A-Best Fixture 公司提供的图片）

2.1 引言

本章节主要关注机械设计方面，即机械系统的物理原理、功能以及制造。当然，这并不表明我们忽视图案、颜色、纹理和客户需求等工业设计方面的内容，而是在完成机械设计之后再对其加以考虑。对产品开发来说，好的机械设计是一个良好的开局，而对材料和工艺合理的选择有助于实现这个目标。

本书的目的是给出一种以设计为导向的材料、工艺选择方法论，即以设计的功能需求为输入。为实现上述目标，我们首先必须简略地审视一下设计过程本身。如同大多数技术领域一样，机械设计也有很多特殊术语，其中一些甚至令人难以理解。虽然我们很少用到，但难以完全避开它们。因此，本章将会介绍一些与设计有关的名词和短语，这些词汇在设计的各个阶段以及相应的材料选择方法中均有所涉及。

2.2 设计过程

设计起源于市场需求或者一个新的想法，一旦满足该需求或者实现该想法的完整

的产品规格书确立，设计也就完成了。在满足需求之前，必须先明确这是个怎样的需求。精确的定义需求是十分必要的，即形成需求报告，它通常以“该设备需要完成任务 X”这种形式来表述，形成一系列的设计要求。为避免先入为主，设计者强调需求报告必须是中性的（即不能暗示怎么执行这个任务）。通常由需求报告演化到产品规格书，需经历如图 2.1 所示的概念设计、具体化设计和详细设计过程，稍候会加以解释。

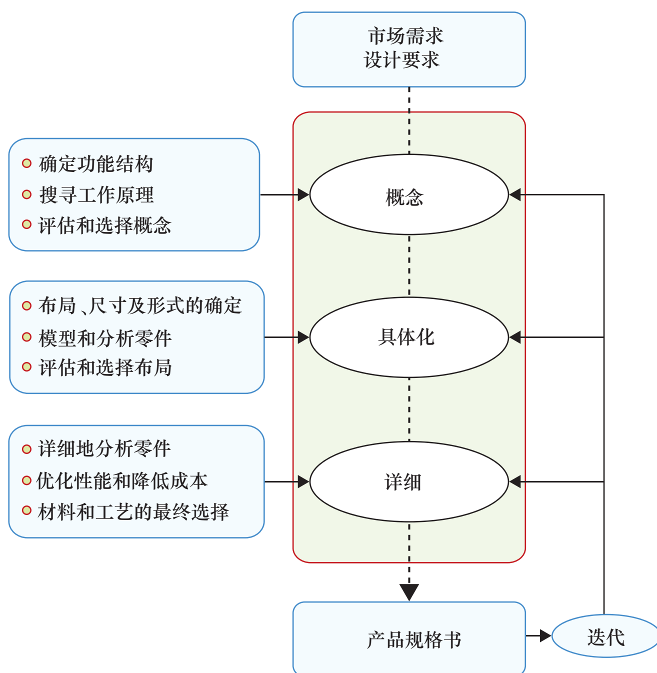


图 2.1 设计流程图（整个设计过程起于市场需求的确认，表征为一系列设计要求，随后经历概念设计、具体化设计以及详细设计阶段，直至形成最终的产品规格书）

产品本身就可称为一种技术系统，可以按图 2.2 方式分解出部件和零件，它们组合在一起以实现所需要的功能。如同描述一只猫（系统）一样，它由一个脑袋、一个身体、一条尾巴和四条腿等（部件）组成，每一部分又由股骨、四头肌、爪子和皮毛等零件组成。这种分解对于分析一个现有的设计来说是一种有效的方式，但是对于一个新的设计本身来说帮助不大。因此，出于这个目的，更好的做法是基于系统分析的理念（见图 2.3），同时考虑信息、能量以及材料三者的输入、传输和输出。

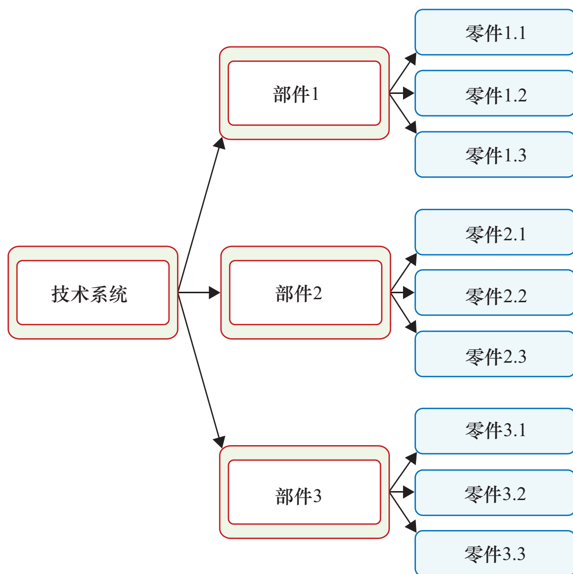


图 2.2 技术系统向部件以及零件的分解（材料及工艺的选择在零件层面进行。）

这种设计是将现有输入转换为

所需输出，如同电动机将电能转换为机械能，锻压设备将材料重新成形，防盗警报器收集信息并转换为警报。通过这种方式，系统被分解为一系列相关联的子系统（见图 2.3），这些子系统分别执行一种功能，由此形成系统的功能结构或功能分解。如同一只猫可描述为呼吸系统、心血管系统、神经系统以及消化系统等子系统的有效组合。功能单元间不同的连接方式，或合并，或分解，形成了不同的设计方案。功能结构提供了一种系统评估设计方案的手段。

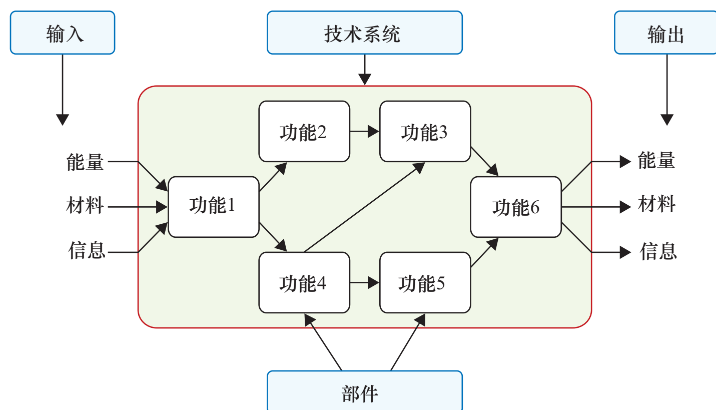


图 2.3 功能结构图（功能结构是进行技术系统分析的一种系统方法，能量、材料和信息在整个结构内进行传递，详尽的功能结构描述有利于替代设计方案的出现。）

随后的设计过程是对功能结构中的功能进行概念构建，每一项概念都基于一种工作原理。概念设计阶段是完全开放的，设计者可以考虑各式各样的概念，以及分解或合并这些概念的方法。在具体化设计阶段，选取有价值的设计概念，并在合适的层面对它们加以分析，包括确定零件尺寸、选择能够在设计所要求的压力、温度和环境内良好运行的材料，并评估其运行性能和成本。具体化设计阶段将会形成一份具有可行性的方案，用于接下来的详细设计阶段。在详细设计阶段，每一个零件的规格书都将被确定，其中一些关键零部件还需进行精确的力学分析或热分析。通过引入优化方法，可以最大限度地提高零件及部件的性能。然后，确定零件的最终几何形状和材料，分析生产方式并评估生产成本，形成一份详细的产品规格书。

然而，整个过程执行起来并不像看起来那么容易，图 2.1 所示的线形流程图使三个阶段之间的强耦合关系不再那么明显。直到进行细节检查时，在概念设计和具体化设计阶段所做选择引起的后果才会显现出来。因此，借助循环迭代来探索其他解决方案是设计过程不可或缺的一部分。

对于任何一种可能的选择我们都要仔细考虑。图 2.4 采用在设计空间中布置一连串圆圈的方式来表征这些可能的选择，其中 C1，C2……是可能的概念，E1，E2……和 D1，D2……分别是可能的具体化设计和可能的详细设计。于是，设计过程变成了不断创建路径并连接相容圆圈的过程，直到实现从上（市场需求）到下（产品规格书）的连接。在这个过程中，有些路径无法走通，还有一些会形成死循环，就像寻找一条能够穿越复杂地形的路径一样，需要反复尝试才能到达终点。一旦路径确定，它总是能以看起来直观且合乎逻辑的方式呈现出来（许多书上也是这么做的），但事实上这条路径更趋近于图 2.4 而非图 2.1 所示的样式。

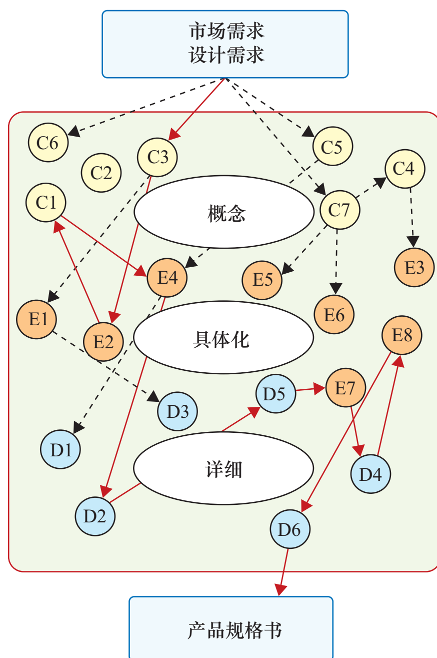


图 2.4 复杂的设计路径

注：图中的 C 圆圈代表概念；E 圆圈代表 C 概念的具体化；D 圆圈代表 E 圆圈的详细实现。

（当一条从“需求”到“规格书”的相容路线确定后，设计过程也就完成了。这是一条充满了死循环和死胡同（虚线）的曲折道路（红线）。因此，我们需要借助工具，以便于在不同的广度和细节层面流畅地获得材料的信息。）

因此，设计以及其材料选择的关键在于灵活性，即快速搜索各种可行方案，并掌握大致框架和细节的能力。下一章我们将重点介绍材料及工艺的选择，这个选择过程存在类似的需求，即需要对大量的材料及成形工艺都有一定的了解，以便快速优选方案。同时，当需要采用该方案时，还能够提供详细的信息。第 4 章的材料性能图和第 5 章介绍的方法对方案选择的确立大有裨益。

抽象的描述不利于人们掌握这些概念。本章 2.6 节中提供的例子将会帮助我们来理解这些概念。首先，我们来看一下有哪些设计类型。

2.3 设计类型

现在的设计并不像以前那样要从草图开始，但原创设计一般始于草图，源于某种新的想法或工作原理（比如圆珠笔和光盘）。新材料往往能够提供新颖独特的性能组合来启发原创设计，如高纯度硅催生了晶体管，高纯度玻璃催生了光纤，高磁矫顽力催生了微型耳机，固态激光器催生了光盘。有时候新材料能催生新产品。同样，有时候新产品也会催生新材料的开发，正如核技术带动了一系列新的锆合金和低碳不锈钢的发展，航空技术促进了轻质复合材料的发展，燃气轮机技术带动了高温合金和陶瓷涂层的发展。原创设计是令人兴奋的，但大多数设计并非如此。

几乎所有的设计都是适应性的，或者说是不断进化的。设计的起始点是一个已知的产品或者产品系列。重新设计它的目的在于改善性能、减少成本或者是使其适应变

化的市场环境。适应性设计采用现存的概念，并通过工作原理的精益求精来寻求性能的提高。有时候，适应性设计也通过材料的发展来实现，如家用电器采用聚合物替代金属，运动装备采用碳纤维替代木头。家用电器和运动装备市场发展迅速且充满竞争，生产厂商能否通过运用新材料不断地改善其产品，直接关系到市场竞争的成败。

最后，改型设计是在不改变性能及其实现方式的前提下，只在尺寸或者细节上做些改动，比如锅炉、压力容器或涡轮的比例放大等。产品尺寸和使用环境的改变可能导致材料的改变，如小舟可以用玻璃纤维制成，大船则需要用钢材制造；小锅炉可以用铜制成，大锅炉则需要用钢材制造；亚声速飞机由某一合金制造，超声速飞机则需要用另一种合金制造——其中的详细原因将会在后面的章节讲到。

2.4 设计工具和材料数据

为实施图 2.1 中的各步骤，需借助于设计工具。如图 2.5 所示，设计工具以输入变量的形式呈现，位于设计方法主框架的左侧。这些工具能够完成设计过程中的建模和优化，简化各个阶段的常规操作。功能建模提供可行的功能结构，结构优化可用于改善形状。几何和三维实体建模模块使得图形可视化，并可以创建文件供数控成形与制造系统下载。优化、DFM（Design for Manufacture，面向制造的设计）和 DFA（Design for Assembly，面向集成的设计）以及成本估算工具使得制造过程更为精细。对于几何形状复杂、大变形以及温度波动的情况，有限元（FE）和计算流体动力学（CFD）软件可以提供精确的热力学分析。随着设计的演化，设计工具也在随之发展，从概念设计阶段的近似分析和模型，到具体化设计阶段更为复杂的建模与优化，再到详细设计阶段的精确（“准确”——虽然从没有实现过）分析。

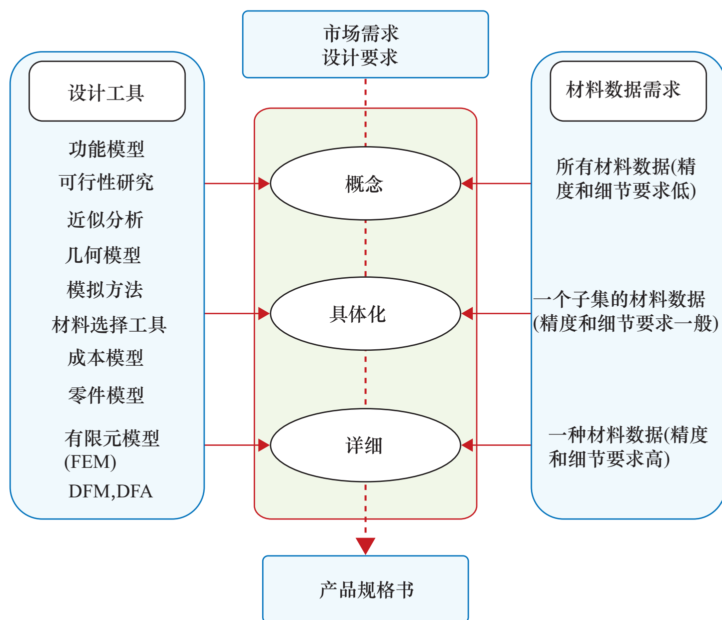


图 2.5 设计流程图（展示设计工具和材料选择如何参与在整个设计过程中。材料信息在设计的各个阶段都有所涉及，但是广度和精度有所不同。反复迭代是设计的一部分。）

在设计的每一个阶段，材料选择工具都扮演着十分重要的角色。就精度和广度而言，初始阶段所需的数据与后续阶段所需的数据存在明显差异（见图 2.5 右侧所示）。在概念设计阶段，设计者只需要近似的属性值，但尽可能广泛的材料范围。一切皆有可能，例如对某个概念来说聚合物可能是最佳选择，对另一个概念金属则可能是最佳选择，尽管最后实现的功能是一样的。这一阶段所关注的问题不是精度和细节，而是选择的广度和速度。如何将这些信息呈现给设计者，从而使其能最大程度地考虑各种设计方案？

在具体化设计阶段，选择范围变窄了。这个阶段仅需要材料数据的一个子集，但对精度和细节的要求比较高。这些信息可以在一些专业手册和软件中找到，这些专业手册和软件一般只涉及一类材料或某个子类（如金属，或者仅仅是铝合金）。该阶段存在的风险是，如果某些细节未能实现，我们就要重新选择材料，但往往忽视了更大的材料范围。人们很容易陷入单向思维，即只看到图 2.4 所示的一组简单“连接”，这个时候其他的连接或许能够更好地解决问题。

在最终阶段，即详细设计阶段，需要的精度更高、细节更多，但仅对应一种或很少的几种材料。对于限定的材料，这些信息最好在材料供应商发布的数据表和一些详细数据库中查找。每种材料（比如聚乙烯）都有一个性能范围，其性能差距主要源于不同的生产厂商采用不同的生产方式。在详细设计阶段，供应商及用于设计的产品性能都要标识出来，因为其他供应商的产品在性能上会有所不同。但是，即便这样有时还是不够完善。对于关键零部件（它的失效将会在某种程度上导致灾难性的后果），出于慎重，应对产品的原材料取样并进行关键性能测试。

产品的投产并非意味着材料信息的输入就此结束。产品会在服役过程中发生失效，这些失效包含很多重要的信息。不对这些信息进行收集并加以分析，对生产商而言是极其不明智的。这些信息通常可以点出材料的错误使用，通过重新设计或重新选择材料将会减少失效。

因此，材料的选择取决于要实现的功能，但这并不是唯一的约束条件。

2.5 功能、材料、形状和工艺

材料的选择与工艺和形状紧密相关。要获得一个形状，材料需要经过一系列加工工序，整个过程称为制造。它包括初始成形工序（如铸造和锻造）、材料去除工序（如切削）、连接工序（如焊接）和精饰工序（如喷漆或电镀）。如图 2.6 所示，功能、材料、形状和工艺之间相互影响。如前所述，功能会影响材料的选择。材料的选择会由于材料的铸造性能、锻造性能、焊接性能以及热处理等方面的因素影响工艺的选择。工艺又决定了形状、尺寸、精度以及成本。由此可见，它们之间的交互作用都是双向的。形状的规格参数限制了材料和工艺的选择。同时，工艺的规格参数也限制了材料的选择和可获得的形状。

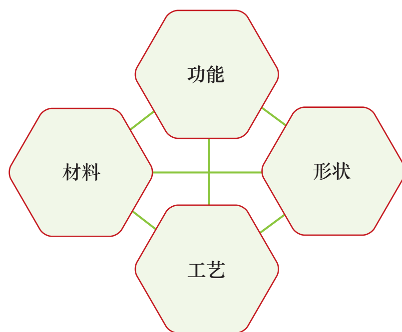


图 2.6 机械设计中材料选择的中心问题：功能、材料、工艺和形状之间的相互影响

设计越复杂，规格参数越严格，交互影响就越显著。

功能、材料、形状和工艺的相互影响决定了材料的选择过程。围绕这样一个贯穿本书的主题，我们后续将依次讨论图 2.6 中的每一个六边形。不过，我们首先用一个案例分析来阐述整个设计过程。

2.6 案例分析：开瓶器

酒就像奶酪，是人类对自然的一种改造。如果人们想保存酒，就要用软木塞将其密封在烧瓶或是瓶子中。"Corticum … demoverbit amphorae …,"（"Unlock the amphora. . ."）Horace 在每年的周年纪念日上都会唱这首歌，来庆祝他奇迹般地从一棵倒下的树下逃生。他是怎么做到的呢？

软木塞密封瓶子的出现使得一种新的市场需求得以迸发，即如何获得酒瓶里的酒。我们可以描述这种需求为"需要一种装置将软木塞从酒瓶中拔出"。但是，需求必须以一种中立的形式陈述，而上面的描述并非如此。我们的目标是获得酒瓶里的酒，然而我们的陈述暗示了解决方案是去除软木塞，而且是通过拔出的方式。显然，还有其他方式可以实现这个目标。因此，我们可以重新描述这个需求为"需要一种装置来获得软木塞密封瓶子里的酒"（见图 2.7），同时可要求"方便、低成本，且不能弄脏瓶子里的酒。"

图 2.7 右侧给出了五种可能的设计概念，依次为 a）通过轴向牵引移除木塞；b）通过剪切牵引力移除木塞；c）自下而上推出木塞；d）粉碎木塞；e）敲碎瓶颈绕开木塞。

目前大多数装置都是基于前三种设计概念，其他的两种概念虽也有使用，但都是在无计可施的情况下才考虑使用。考虑到后两种设计概念可能弄脏酒，这里不再考虑，而是将重点放在前三种设计概念上，仔细探寻其工作原理。图 2.8 针对上述三种设计概念各给出了一个例子。图 2.8a 为采用螺钉旋入软木塞以施加轴向拉力；图 2.8b 为将细长的弹性刀片沿木塞边缘插入，通过边旋边拉的方式给木塞施加剪切牵引力；图

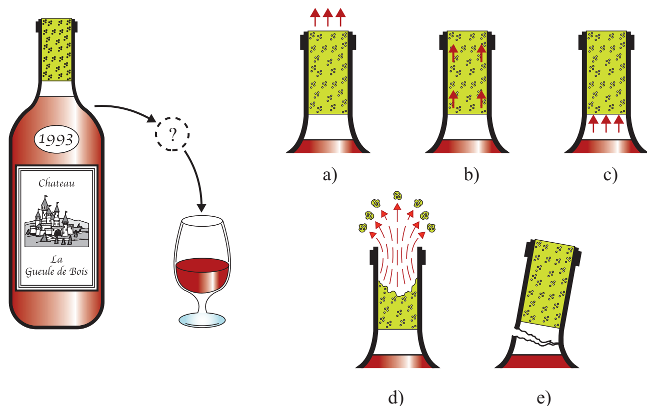


图 2.7 开瓶器的市场需求与可能的设计概念
左侧：市场需求——设计一种装置来获取软木塞密封瓶子里面的酒；
右侧：五种可能的设计概念（阐明满足需求的物理原理）

2.8c 为用空心针穿透软木塞，将气体通过空心针充入酒瓶中，从而将木塞顶出。这三种设计概念的具体案例已在图 2.0 中列出。

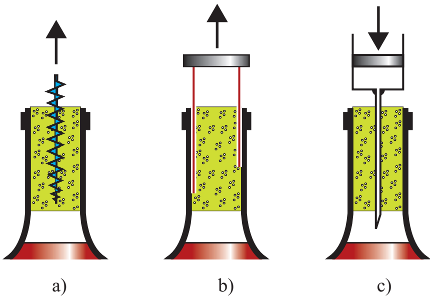


图 2.8 实现图 2.7 所示前三种设计概念的工作原理

（图 2.0 已给出这三种设计概念的具体案例。）

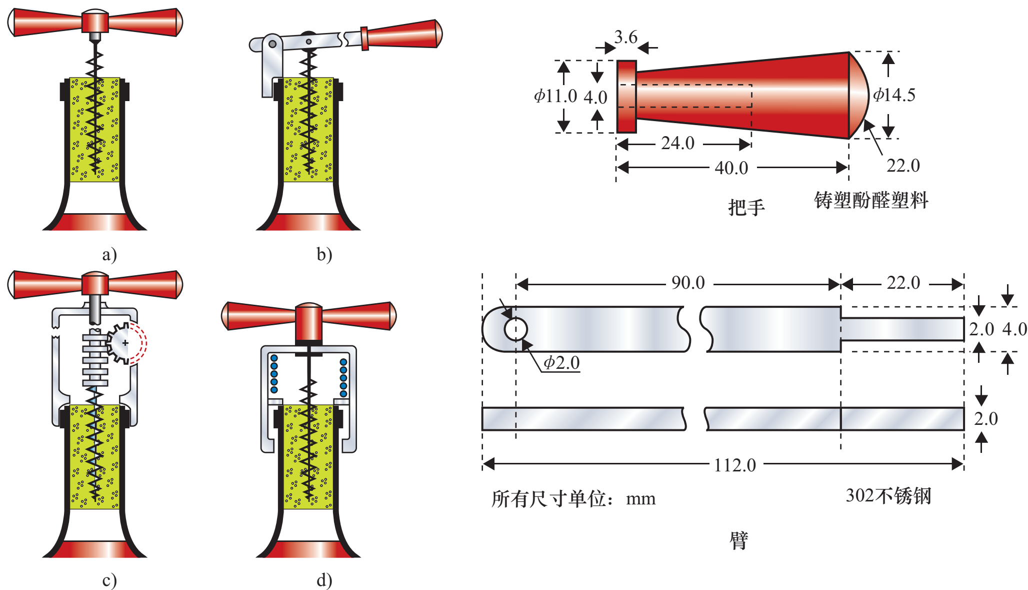


图 2.9 左侧：具体化设计

右侧：杠杆实例的详细设计（所有尺寸单位：mm）

a）直接牵引 b）杠杆牵引 c）齿轮辅助牵引 d）弹簧辅助牵引

图 2.9 展示了基于轴向牵引力设计概念的装置的具体化设计草图。其中，图 2.9a 为直接牵引，而其他三个（图 2.9b，c 和 d）都运用了机械特性，如杠杆牵引、齿轮辅助牵引和弹簧辅助牵引等。上述具体化设计明确了装置各零件的功能需求。这些功能需求可以描述成以下形式。

* 螺钉，用于传递一定的载荷至软木塞。
* 轻杠杆（或梁），用以承受一定的弯矩。
* 细长的弹性刀片，在软木塞和瓶颈之间移动时不会发生弯曲。
* 细小的空心针，要有足够的硬度和强度以穿透软木塞。

零件的功能需求是材料选择过程的输入条件，直接决定了材料类型和性能限制。在第 5 章中，我们将根据“高强度轻质梁”或者“细长弹性刀片”等要求来标识满足

该性能要求的材料子集。材料及其工艺的最终选择是详细设计阶段的重要组成部分（见图 2.9），用于形成完整的规格书以指导生产制造。

这里，我们回顾一下功能结构的设计理念来进行小结。在图 2.10 中，上侧给出了软木塞移除器的功能结构，即：施加一个作用力，传递这个作用力，然后将力作用到软木塞上。不同的设计，区别在于实现这些功能的工作原理有所不同。正如图 2.10 下侧所示，不同的连接方式就会产生不同的设计。

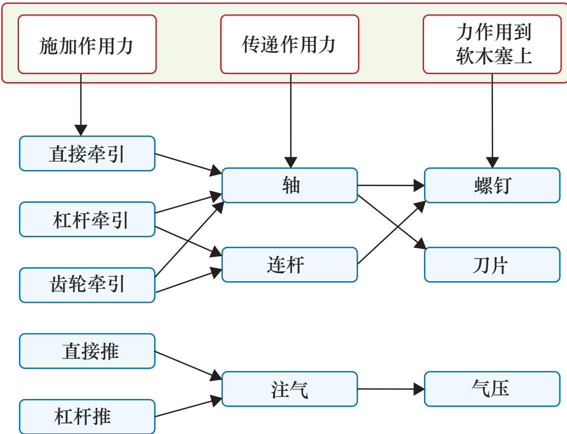


图 2.10　软木塞移除器的功能结构和工作原理

2.7　本章小结

设计是一个反复修改的过程。设计的出发点在于将市场需求落实到设计要求。围绕这些需求，可以形成一个产品概念。如果初步评估以及其他方案的探索表明这个概念可行的话，设计过程进入到具体化设计阶段，即选择工作原理、决定大小和布局、对性能和成本进行评估。如果都符合，设计者就可以进行详细设计，即性能优化、关键部件的完整分析、详细生产图样（通常为 CAD 文件）的准备，以及公差、精度和装配和精饰方法的规格参数。

材料的选择贯穿整个设计过程，但每个阶段的广度和精度有所不同。在概念设计阶段，所有的材料及其加工工艺都是潜在的候选者，因此需要对大量的材料数据进行快速了解，不必考虑精度的问题。从初步选择进入到具体化设计阶段后，计算和优化工作所需要的信息不仅要求精度高，而且详细。在最后的详细设计阶段，大多数选择被排除，仅留下几种候选材料和工艺。对于这些候选者来说，我们必须具有详细精确的数据。

能够满足所有阶段要求的数据是存在的，但每个阶段的数据都需要一个专门的管理策略。这将会在下面的章节中具体讨论。这类管理系统必须以设计为导向，同时具有选择的丰富性，还要兼顾到材料、形状、工艺及功能四者之间复杂的相互影响。此外，当某一路径行不通的时候，该系统需能够迅速返回迭代。现在已经有很多工具能够实现这些功能。本书后续章节将围绕 CES 材料及工艺选择平台这一工具展开。

但是，考虑到整个过程的复杂性，为什么不选择更安全的方式，即坚持之前所采

用的呢？很多人做了这样的选择，但基本上都做不下去了。

2.8 扩展阅读

设计方法的书籍和材料选择的书籍之间存在很大的分歧，往往都是由于一方忽视了另一方。French 所著的书见解独到，然而索引中却没有“材料”这个词。Pahl 和 Beitz 是设计界的泰斗，但是他们的文章却很难懂。Ullman 和 Cross 介绍了一种轻松且易于理解的方式。Budinski、Charles、Crane 和 Furness 的书以及 Farag 的书都有详尽的材料案例，但在设计上做得还不够好。Lewis 通过案例分析来解释材料的选择，但是没有发展为一种系统方法。或许，Dieter 做到了两者的有机结合。

1. 设计方法的参考书籍

1）Cross, N. (2000). *Engineering design methods* (3rd ed.). Wiley, ISBN 0-471-87250-4.

一本关于设计过程的书籍，强调不同方案的阐释与评估。

2）Dieter, G. E., & Schmidt, L. C. (2009). *Engineering design* (4th ed.). McGraw-Hill, ISBN 978-0-07-283703-2.

介绍得非常清楚，作者有着很浓厚的材料背景。

3）French, M. J. (1985). *Conceptual design for engineers*. The Design Council, London, and Springer, ISBN 0-85072-155-5 and 3-540-15175-3.

“概念-具体化-详细”设计过程框图的出处。该书重点在于概念设计阶段，展示如何运用简单的物理原理来形成设计问题的解决方案。

4）Pahl, G., & Beitz, W. (1997) *Engineering design* (2nd ed.). Translated by K. Wallace & L. Blessing. The Design Council, London, and Springer Verlag, ISBN 0-85072-124-5 and 3-540-13601-0.

技术设计领域的“圣经”，所提出的方法延续了严谨的德国体系。

5）Ullman, D. G. (1992). *The mechanical design process*. McGraw-Hill, ISBN 0-07-065739-4.

美国人对于设计的观点，以分步骤的方式处理初始设计有缺陷的产品，与本文中图 2.1 所示方法类似。

6）Ulrich, K. T., & Eppinger, S. D. (1995). *Product design and development*. McGraw-Hill, ISBN 0-07-065811-0.

一本关于产品设计的易读且全面的书籍，在 MIT 被作为教材。书中有很多很有用的例子，但是几乎没有提及材料。

2. 材料选择的参考书籍

1）Ashby, M., Shercliff, H., & Cebon, D. (2010). *Materials: Engineering, science, processing and design* (2nd ed.). Butterworth-Herinemann, ISBN 978-1-85617-895-2. North American edition: ISBN 13: 978-1-85617-743-6.

介绍性的书籍，相关的内容在本书已作了详细展开。

2）Askeland, D. R., & Phulé, P. P. (2006). *The science and engineering of materials* (5th ed.). Thomson, ISBN 0-534-55396-6.

一本久负盛誉的材料书籍，涉及很多工程材料科学。

3）Budinski, K. G., & Budinski, M. K. (2010). *Engineering materials, properties and selection* (9th ed). Prentice Hall, ISBN 978-0-13-712842-6.

同上一本书籍一样，这也是一本久负盛誉的材料书籍，涉及材料属性和工艺。

4）Callister, W. D. (2010). *Materials science and engineering: An introduction* (8th ed.). John Wiley & Sons, ISBN 978-0-470-41997-7.

一本很好的书籍，采用一种科学引领的方式进行材料教学展示。

5） Charles, J. A. , Crane, F. A. A. , & Furness, J. A. G. （1997）. *Selection and use of engineering materials* （3rd ed. ）. Butterworth-Heinemann, ISBN 0-7506-3277-1.

更多地从材料科学而不是设计引领的方式来处理材料选择。

6） Dieter, G. E. （1999）. *Engineering design, a materials and processing approach* （3rd ed. ）. McGraw-Hill, ISBN 9-780-073-66136-0.

一本受人尊敬的书籍，注重于技术设计中材料与工艺的定位。

7） Farag, M. M. （2008）. *Materials and process selection for engineering design* （2nd ed. ）. CRC Press, Taylor and Francis ISBN 9-781-420-06308-0.

从材料科学角度来实施材料选择。

8） Lewis, G. （1990）. *Selection of engineering materials*. Prentice-Hall, ISBN 0-13-802190-2.

面向技术设计的材料选择书籍，书中给出了很多案例。

9） Shackelford, J. F. （2009）. *Introduction to materials science for engineers* （7th ed. ）. Prentice Hall. ISBN 978-0-13-601260-4.

一本享有盛誉的材料书籍，偏向设计多一些。

3. 软木塞和开瓶器的参考书籍

1） The Design Council. （1994）. Teaching aids program EDTAP DE9. The Design Council, London.

2） McKearin, H. （1973）. On “stopping” bottling and binning. *International Bottler and Packer*, （April）, 47-54.

3） Perry, E. （1980）. *Corkscrews and bottle openers*. Shire Publications.

4） Watney, B. M. , & Babbige, H. D. （1981）. *Corkscrews*. Sotheby's Publications, ISBN 0-85667-113-4.

第3章

工程材料及其性能

丙烯腈（简称 ABS）

基本属性		
密度	1100 ~1200	kg/m^3
价格	2.1~2.5	USD/kg
力学性能		
弹性模量	1.1~2.9	GPa
屈服强度	19~51	MPa
抗拉强度	28~55	MPa
伸长率	15~40	(%)
硬度(维氏)	5.6~15	HV
疲劳强度(10^7 次循环)	11~22	MPa
断裂韧度	1.2~4.3	$MPa \cdot m^{1/2}$
热性能		
玻璃化温度	360~400	K
最高工作温度	340~350	K
最低工作温度	150~200	K
导热系数	0.19~0.34	W/(m·K)
比热容	1400~1900	J/(kg·K)
热膨胀系数	85~230	10^{-6}/℃
电性能		
电阻率	3.3×10^{21} ~ 3×10^{22}	μΩ·cm
介电常数	2.8~3.2	
介电损耗角正切	0.003~0.007	
绝缘强度	14~22	MV/m
生态性能		
内涵能	91~$1e^2$	MJ/kg
CO_2 排放量	3.3~3.6	kg/kg

工程材料 ABS 的部分性能

材料

丙烯腈(简称 ABS),强度高,弹性好,且易于成型,通常不透明。但某些高级的丙烯腈也可以是透明的,而且还具有不同的颜色。

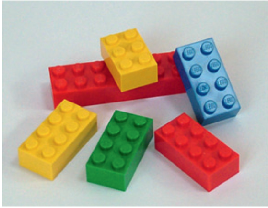


图 3.0 ABS 的相关信息

ABS-PVC 合金比标准 ABS 的强度更高,具有较高的自熄等级,常用于电动工具外壳。从图中可以看出,ABS 的成型性能和着色性能良好,无毒且强度足够满足孩子的使用要求。

典型应用

安全帽、帐篷顶盖、汽车仪表盘和其他内饰零件、管道配件、家用安全设备或是小型仪器的保护罩、通信设备、商用机器、水暖五金、汽车格栅、轮圈盖、镜子壳、冰箱内衬、行李箱、托盘、割草机护罩、船体、游艺车的大型零件、防水密封条、玻璃念珠、冰箱垫层、导管、排污(DWV)系统管道。

供应商

Claradex、Comalloy、Cycolac、Hanalac、Lastilac、Lupos、Lustran ABS、Magnum、Multibase、Novodur、Polylac、Porene、Ronfalin、Sinkral、Terluran、Toyolac、Tufrex、Ultrastyr。

3.1 引言

有人说，材料是设计的食物。在本书作者看来，确实如此，因此本章也会给出这样一份菜单，即材料的选购清单。性能良好、价格实惠且令使用者满意的产品，才是成功的产品。这类产品往往采用了最合适的材料并充分发挥了材料的潜能和特性。换句话说，真正做到物尽其用。

材料的种类有很多，包括金属、聚合物、陶瓷等等，这些将在本章 3.2 节中加以介绍。设计过程中如果需要用到某些材料，那么我们需要了解他们的哪些信息呢？这将是本章 3.3 节的主题。在这一节中，我们将对各种各样的材料信息进行归类。但是，我们的目标并不是寻找一种材料，而是寻找能满足设计要求的性能组合表。性能是材料世界的流通货币，是讨价还价的核心，是选择某种材料的重要参考。本章 3.4 节简要定义了热力学设计所需要的一些重要性能。内容比较无趣，如果读者对模量、强度、阻尼容量、导热系数、电导率等诸如此类性能的定义和单位非常熟悉，可以跳过这一部分。在以后的工作中若有需要，可参考相关性能图表。但是，请不要跳过本章 3.2 节，这部分内容给出了贯穿全书的分类结构。末尾照例是本章小结。

3.2 工程材料的类别

通常情况下，工程材料可分为图 3.1 所示的金属、聚合物、弹性体、陶瓷、玻璃以及复合材料 6 大类。一类材料通常具有一些共性特点，比如相似的性能、相似的加工工艺，以及相似的应用。

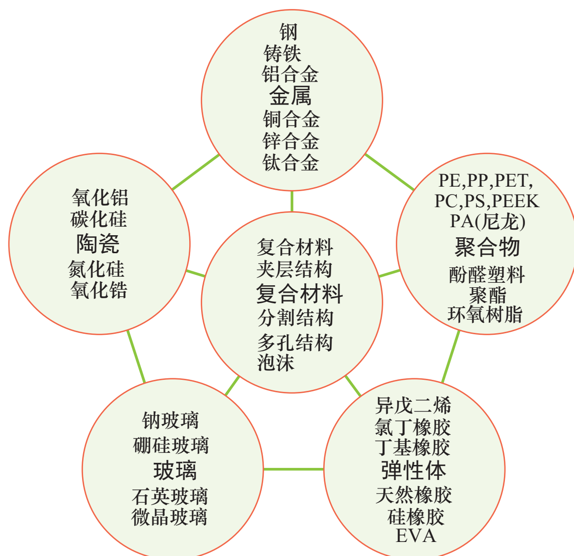


图 3.1 工程材料（通过不同的方式将金属、陶瓷、玻璃、聚合物和弹性体组合起来可形成复合材料。）

1）金属：硬度较高，具有相对较高的弹性模量。一般情况下，纯金属较软且易于成形，可以通过合金化、机械加工及热处理方式来提高强度的同时仍保持延展性，因此适用于塑性成形。某些高强度合金（例如弹簧钢）的伸长率只有 1%，但即便如此也

足以保证材料在断裂前发生屈服，即使发生断裂，也属于韧性断裂。从某种程度上来说，金属的高延展性使得其易发生疲劳。在所有的材料种类中，金属最易发生腐蚀。

2）陶瓷：也具有很高的弹性模量，但和金属不同，陶瓷材料非常脆。这类材料的抗拉强度等同于脆性断裂强度，抗压强度等同于脆性抗碎强度，后者约为前者的 15 倍。陶瓷几乎没有延展性，因此不允许有应力集中（如裂纹或孔洞）或高接触应力（例如夹持点）等情况发生。韧性材料可以通过变形的方式使得应力更加均匀地分布，以此来缓解应力集中。正因为如此，它们可以在接近屈服强度的静力载荷情况下使用。然而，陶瓷却不能。脆性材料的强度不稳定，取决于受力材料的体积和加载时间，所以陶瓷材料不像金属材料那么易于在设计中使用。当然，陶瓷也有其优势，它们强度高、硬度高、耐磨性能好（因此常常用作轴承和切削工具），在高温下依然保持高强度，并有很好的耐蚀性。

3）玻璃：是非晶态固体，最常见的是钠钙玻璃和硼硅玻璃，用于玻璃瓶和烤箱器皿。除此之外，还有很多种不同的玻璃。金属也可以通过急速冷却来获得非晶体结构。如同陶瓷一样，由于没有晶体结构，玻璃的塑性很差，且硬而脆，不能承受应力集中。

4）聚合物：不同于以上各类材料，它具有很低的弹性模量，大约只有金属弹性模量的 1/50。但是，其强度却很高，几乎与金属相当，由此可承受很大的弹性挠曲。即使在室温下，聚合物也会发生蠕变，这就意味着聚合物零件在长时间承载时必须要有一个固定装置。聚合物的性能很大程度上取决于温度，在 20℃ 时具有高强度和高韧性的聚合物，放置于 4℃ 的家用冰箱内时就变成了脆性材料，而在 100℃ 的沸水里时又会发生快速蠕变。在 200℃ 以上温度时，几乎没有聚合物还能保持工作强度。有些聚合物是以晶体结构为主，有些是非晶体，还有一部分是晶体和非晶体的混合物。透明材料一般是非晶体结构。如果在设计中充分考虑上述特性，那么聚合物的诸多优势就可尽情地发挥出来了。就比强度这类综合性能指标而言，聚合物甚至可以与金属一较高下。聚合物易于成型，多功能的复杂聚合物零件甚至可以一次成型。巨大的弹性挠曲使得聚合物零件易于咬合连接，装配快捷且价廉。若采用精密模具和预着色的生产方式，最终精饰工序都可以省去。此外，聚合物耐腐蚀（涂料是一种聚合物），具有较小的摩擦系数。充分发挥聚合物的这些特性就可以成就好的设计。

5）弹性体：在处于玻璃化温度 T_g 以上时是一种长链聚合物，在 T_g 以下时，这类材料分子间的共价键保持稳定，但用来连接分子链的较弱的范德华力和氢键会融化。这些特性使得弹性体具有十分独特的性能，其弹性模量只有 10^{-3}GPa（典型金属弹性模量的 $1/10^5$），且随着温度的升高而增大（其他类的固体都随着温度的升高而减小），同时弹性伸长量很大。弹性体的特性与其他固体的差距如此之大，因此需借助专门的试验来评估其性能，这就带来了一个问题。本书是基于所设定的性能组合表来进行材料的选择，那么前提条件就是这些性能需适用于所有材料。为克服上述问题，我们在设计初期使用一组通用性能，对类似弹性体这种特殊材料采用近似值来评价。对于仅仅在某一类材料中才会用到的特定性能，则把它们单独储存起来，在设计后期再使用。

6）复合材料：是两种及两种以上的材料按照特定的配置和比例结合形成的材料，从而有效地扬长避短。本书第 11 章和第 12 章中将详述围绕这类材料的设计过程。复合材料包括纤维、特种树脂、夹层结构、多孔结构、泡沫、电缆和层压板。几乎所有的天然材料，如木材、骨头、皮肤和树叶，都是复合材料。最常见的复合材料就是纤维强化的复合材料。目前，大多数工程应用的复合材料都是在聚合物基体上加入强化的玻璃纤维、碳纤维或者苯二胺纤维（芳纶）。这些材料质轻、硬度和强度高，且韧性也

很好。由于会发生软化，这些以聚合物为组成成分的复合材料不能在 250℃ 以上的温度中使用，但在室温下其表现出众。聚合物零件成本较高，成型性差且难以连接。因此，尽管复合材料有诸多优良性能，设计者只有在性价比合理的情况下才会使用。如今，对高性能和低能耗要求的日益突出，必将大大推动复合材料的使用。

对于上述材料分类，接下来我们需要了解它们的哪些信息呢？

3.3 设计所需的材料信息

工程师在设计过程中选择材料时，需要了解材料的性能数据。通常他们会选择他们所熟悉的材料，很少考虑他们不熟悉的材料，即便那些材料性能良好。那些经试验证明效果良好的材料，往往数据全面、可靠且易于查找，而新材料的数据则不够完善且可信度不够。然而，往往新材料才有可能激发创新，因此对于数据质量的辨识尤其重要。

在进行设计时，哪些材料信息是我们所需要的呢？图 3.2 给出了相关的分类。通过左侧所示的材料测试我们可以获得数据，但这些原始数据对于设计工作而言，几乎没有任何价值。为了使数据有用，还需进行统计分析。当大量的样品完成测试后，我们可以获得性能的平均值和标准差。有了这些，我们就能计算出许用值，即具有一定置信度和可靠度的性能值。通常，材料试验给出的是测试数据，而大部分工程手册的数据则是许用值。

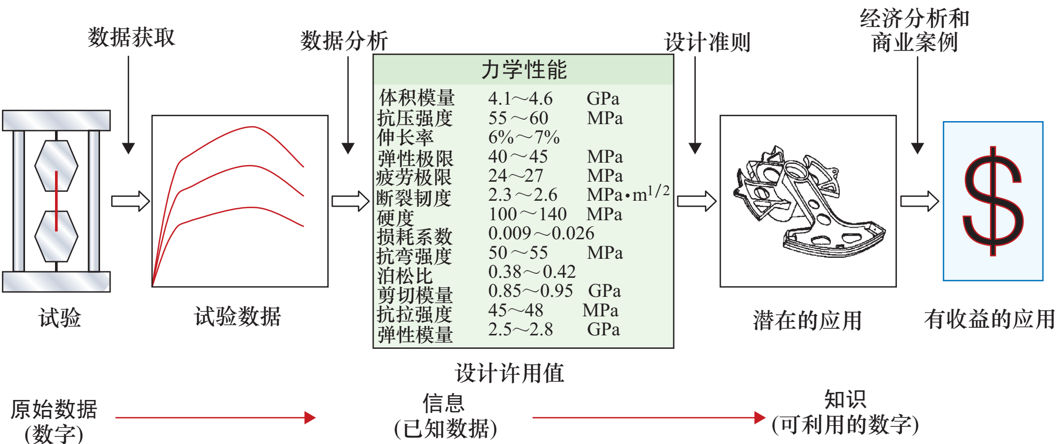


图 3.2 材料信息分类（图中央这一类是我们所感兴趣的材料信息，包括结构化的设计许用值数据，与成形、连接、精加工有关的材料特性、应用记录以及面向应用的设计指南。）

信息是指已知精度和来源的数据，一般可以采用数字表格、是或否的判断、排序的方式表示出来，即可以结构化。所有材料都具有许多可结构化的属性，如密度、弹性模量、强度和导热系数。这些结构化信息可存储在数据库中。由于所有材料都具有这些属性，因此材料选择的第一步可以围绕这些结构化信息展开。本章图 3.0 列出了聚合物 ABS 的部分信息，还列出了相关的结构化数据。由于不同生产商的生产方式不同，这些数据在一定范围内波动。

结构化数据给设计者的材料选择提供了帮助，但是还远远不够。利用某种材料进行设计时，需要知道它真正的特性，它的优势与劣势。怎样成形？如何连接？以前被谁用来做过什么？成功还是失败？为什么？这些信息存储于手册中，记录为设计指南，报道于失效分析和案例分析中。它包含大量文本、图表和影像，且其中的某些特定内容仅适

用于一种材料，对另一种材料则不然。这类辅助信息被称为文档，其内容错综复杂，但在选择材料时却是不可或缺。图 3.0 中的图像和相关文字就是文档的典型例子。

此外，材料的使用也要符合一系列标准和规范。这些标准和规范很少针对单一材料，而是针对一类材料或某一子类。比如，与食物或药品相关的材料必须获得 FDA 或者同等机构的认证；用在美国军用飞机上的金属和复合材料必须获得军用规格认证；要想成就面向环境的最佳实践设计，材料的使用必须遵循 ISO 14040 的要求。诸如此类的标准和规范还有很多。这些信息也是文档的一部分（见表 3.1）。所有这些材料信息，无论是结构化数据还是非结构化数据，一起构成了知识。

表 3.1 面向设计的材料特性及其常用单位（国际单位制）

分类	性　能	符号与单位
综合	密度	ρ/(kg/m^3 或 Mg/m^3)
	价格	C_m/($/kg)
力学	模量,弹性,剪切体积	E,G,K/GPa
	屈服强度	σ_y/MPa
	抗拉强度	σ_{ts}/MPa
	抗压强度	σ_c/MPa
	失效强度	σ_f/MPa
	硬度	H(*Vickers*)
	延伸率	ε(-)
	疲劳极限	σ_e/MPa
	断裂韧度	K_{IC}/(MPa·m$^{1/2}$)
	韧度	G_{IC}/(kJ/m^2)
	损耗系数	η(-)
	磨损系数	K_A/MPa^{-1}
热学	熔点	T_m/℃ 或 K
	玻璃化温度	T_g/℃ 或 K
	最高工作温度	$T_{\max}$/℃ 或 K
	最低工作温度	$T_{\min}$/℃ 或 K
	导热系数	λ/(W/(m·K))
	比热容	C_p/(J/(kg·K))
	热膨胀系数	α/K^{-1}
	热抗震性	ΔT_s/℃ 或 K
电学	电阻率	ρ_e/(Ω·m 或 μΩ·cm)
	介电常数	ε_r(-)
	击穿电压	V_b/(10^{6}V/m)
	功率因数	P(-)
光学	折射率	n(-)
生态性能	内涵能	H_m/(MJ/kg)
	碳足迹	CO_2/(kg/kg)

从公制到英制和 cgs 制的转换系数位于本书的前后封面。

如图 3.2 右侧所示，一件产品要想赢得市场，必须在经济上可行，且在性能、消费者诉求以及成本方面与其竞争者相比有优势。这些优势来源于材料的选择及其加工方式。关于这方面的内容还有很多，而此处的重点在于结构化数据和文档，因此不作展开。

以上内容是一些重要的背景信息，接下来我们将逐一介绍这些性能。

3.4　材料性能及其单位

每种材料都具有一系列的属性或性能，这些体现材料特点的性能组合称为性能组合表，其数据是通过系统性的测试获得的。本节我们将简要介绍测试的原理以及材料性能的定义和单位（见表 3.1）。性能值列于附录 A 中。本章给出的单位均遵从国际单位制，与其他系统的转换系数位于本书的前后封面。

3.4.1　基本性能

1）密度（ρ，单位：kg/m^3），即单位体积的质量。测量方法与阿基米德的方法一致，即在空气和已知密度的液体中进行称重。

2）价格（C_m，单位：$/kg），不同材料差异很大，有的低至 0.2 $/kg，有的高达 1000 $/kg。当然，价格还会发生小范围波动，这取决于所需材料的质量以及采购者是否是供应商的优先客户。尽管有不确定因素，但在材料选择初期，大概的价格也是有参考价值的。

3.4.2　力学性能

1）弹性模量（E，单位：GPa 或 GN/m^2）是应力应变曲线中初始线弹性部分的斜率（见图 3.3）。弹性模量 E 描述了材料对拉伸或者压缩载荷的响应，剪切模量 G 描述了材料对剪切载荷的响应，体积模量 K 描述了材料对静水压力的响应。泊松比 ν 是轴向加载时，横向应变 ε_2 与轴向应变 ε_1 的比值的负数。

$$\nu = -\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}$$

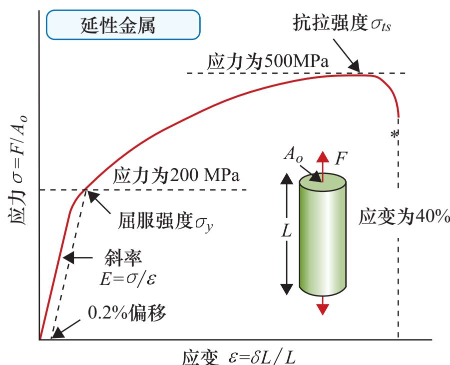


图 3.3　应力应变曲线（金属），给出了弹性模量 E，0.2%屈服强度 σ_y 和抗拉强度 σ_{ts}

事实上，以应力应变曲线的斜率作为模量是不精确的，大约会小一半甚至更多，这主要归因于由非弹性变形、蠕变和其他因素导致的应变增大。精确的模量都是动态测量的，可通过梁振动法或波动传递技术等试验方法来实现。

针对各向同性材料，上述模量之间有如下对应关系：

$$E=\frac{3G}{1+G/3K} \quad G=\frac{E}{2(1+\nu)} \quad K=\frac{E}{3(1-2\nu)} \tag{3.1}$$

通常情况下，

$$\nu \approx 1/3$$

则：

$$G \approx \frac{3}{8}E$$

$$K \approx E \quad (3.2a)$$

对于弹性体材料来说，

$$\nu \approx 1/2$$

则：

$$G \approx \frac{1}{3}E$$

$$K \gg E \quad (3.2b)$$

4 种模量的具体数值可以在附录 D 中的数据来源中找到。本书我们仅考虑弹性模量 E 的数据，如有需要，其他模量的近似值可通过式 3.1 换算得到。

模量估算

铜的弹性模量 E 为 124GPa，泊松比 ν 为 0.345，计算其剪切模量 G。

答：将 E 和 ν 的数值代入式（3.1），得到 G = 46.1GPa。实际测量值为 45.6GPa，两者的误差仅 1%。

2）强度（σ_f，单位：MPa 或 MN/m^2），对于固体来说，其定义不尽相同。对于金属来说，我们将 σ_f 等同于 0.2% 屈服强度 σ_y，即轴向加载时，在应力应变曲线上与线弹性部分偏移 0.2% 应变时获得的应力。对于拉伸和压缩，所采用的方法相同。对于聚合物来说，σ_f 等同于应力应变曲线发生显著非线性转变点的应力，通常对应 1% 应变处（见图 3.4）的应力值。这种现象的出现可能是由剪切屈服引起的，即分子链的不可逆滑移；也可能由细微裂纹引起，即低密度裂纹状聚合物带的形成，使聚合物断口平直且呈白色。聚合物在受压时比受拉时强度略有提高（提高约 20%）。

对于陶瓷和玻璃而言，强度取决于加载方式（见图 3.5）。拉伸时，强度即为断裂强度 σ_t；在压缩时，强度为抗碎强度 σ_c。一般情况下，抗碎强度要远大于断裂强度：

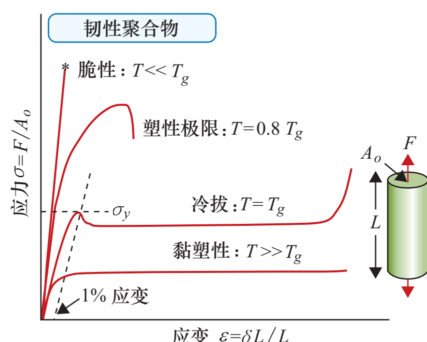


图 3.4 聚合物的应力应变曲线（大于、等于和小于 T_g 的情况。）

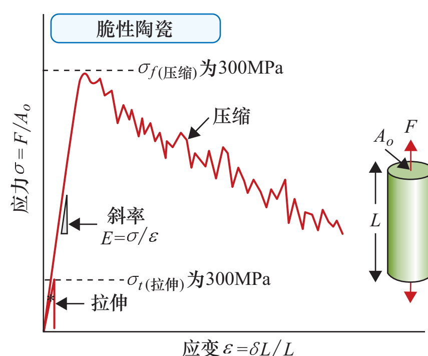


图 3.5 陶瓷受拉伸和压缩时的应力应变曲线（抗压强度 σ_c 是抗拉强度 σ_t 的 10~15 倍。）

$$\sigma_c=(10\sim15)\sigma_t \tag{3.3}$$

对于像陶瓷这类难以夹紧的材料，其强度可通过弯曲来测定。抗弯强度或弯曲强度（σ_{flex}，单位：MPa）为弯曲梁在失效瞬时承受的最大表面应力（见图 3.6）。有人可能认为其结果与拉伸中测得的强度一样，实则不然，陶瓷的抗弯强度大约是抗拉强度的 1.3 倍。这是因为在弯曲过程中，承受最大应力的部分体积较小，且内部存在较大缺陷的可能性也很小，而在简单拉伸中，所有缺陷都要承受相同的应力。

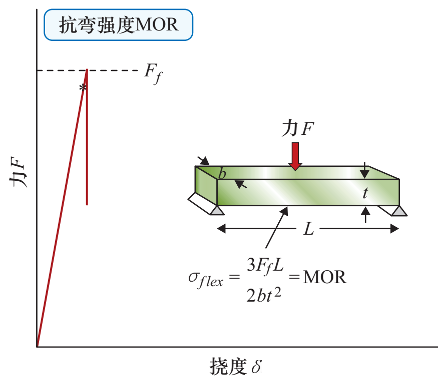


图 3.6 抗弯强度（MOR）是弯曲试验中断裂时刻的表面应力，等于或略大于拉伸中的断裂强度

复合材料的强度一般定义为偏离线弹性行为 0.5% 偏移量的应力值。含纤维的复合材料以及像木材这类天然复合材料，由于纤维会发生屈曲，其抗压强度略低于抗拉强度（低约 30%）。在接下来的几章中，复合材料的强度 σ_f 指其抗拉强度。

强度主要取决于材料的类别和加载的方式。除拉、压加载方式外，其他的加载方式也是有可能的，例如剪切。在复杂应力条件下的屈服强度与简单拉伸的屈服强度可以通过屈服准则联系起来。对于金属而言，一般采用 Mises 屈服准则：

$$(\sigma_1-\sigma_2)^2+(\sigma_2-\sigma_3)^2+(\sigma_3-\sigma_1)^2=2\sigma_f^2 \tag{3.4}$$

式中，σ_1，σ_2，σ_3 为主应力，拉伸时为正；按照惯例，σ_1 为最大值，σ_3 为最小值。聚合物的屈服准则需引入静水压力进行修正：

$$(\sigma_1-\sigma_2)^2+(\sigma_2-\sigma_3)^2+(\sigma_3-\sigma_1)^2=2\sigma_f^2\left(\frac{1+\beta p}{K}\right)^2 \tag{3.5}$$

式中，K 为聚合物的体积模量；$\beta\approx2$ 是压力对流动应力的影响系数，静水压力 p 定义为

$$p=-\frac{1}{3}(\sigma_1+\sigma_2+\sigma_3)$$

对于陶瓷而言，其屈服准则遵循库伦流动法则：

$$\sigma_1-B\sigma_2=C \tag{3.6}$$

式中，B 和 C 均是常数。

3）抗拉强度（或极限强度）σ_{ts}（单位：MPa），是棒料在拉伸载荷作用下发生断裂时的名义应力值（见图 3.3）。对于陶瓷、玻璃和脆性聚合物这类脆性材料，同样也是将拉伸载荷作用下发生断裂时的强度作为抗拉强度。因为加工硬化的作用（复合材料的粒子强化作用），金属、延展性好的聚合物和大多数复合材料，抗拉强度要比屈服强度大 1.1~3 倍。

屈服准则的应用

半径为 r，厚度为 t 的金属管道，受到的内部压力为 p，该压力使管壁受到径向应力 $\sigma_1=pr/t$，轴向应力 $\sigma_2=pr/2t$，问当压力多大时，管道发生屈服？

答：将 $\sigma_2=\sigma/2$，$\sigma_3=0$，$\sigma_f=\sigma_y$ 代入式（3.4），得到屈服条件为 $\sigma_1=(2/\sqrt{3})\sigma_y$，因此引起首次屈服的临界压力值为 $p^*=\dfrac{2}{\sqrt{3}}\dfrac{t}{r}\sigma_y$。

循环加载容易导致材料内部裂纹的产生和扩展，直至发生疲劳断裂。很多材料都有疲劳极限 σ_e（单位：MPa），可以用图 3.7 中的 $\Delta\sigma$-N_f 曲线来描述。在循环应力幅值低于疲劳极限的情况下，材料不会发生失效或在大量循环（$N_f>10^7$）之后才会失效。

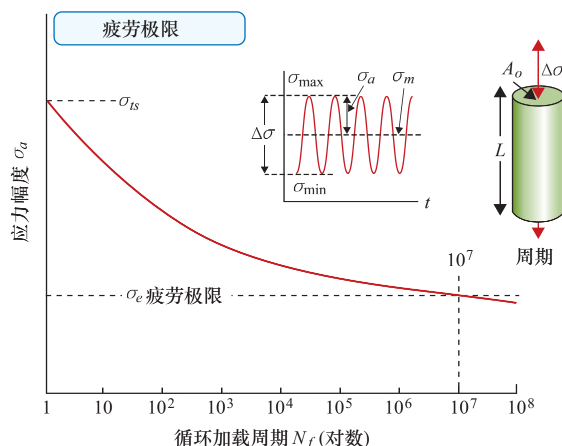


图 3.7 疲劳极限 σ_e 对应材料在循环加载 10^7 个周期后发生断裂的应力幅值

拉伸和压缩试验需要用到较大的试样且属于破坏性试验，因此有时候并不实用。硬度试验是一种近似的、非破坏性的强度测量方式。通过将点状金刚石或硬质钢球压入材料表面可得到硬度（H，单位：MPa）（见图 3.8）。硬度定义为产生压痕的力与接触面积的比值。硬度和强度之间的数量关系为：

$$H\approx 3\sigma_f \qquad (3.7)$$

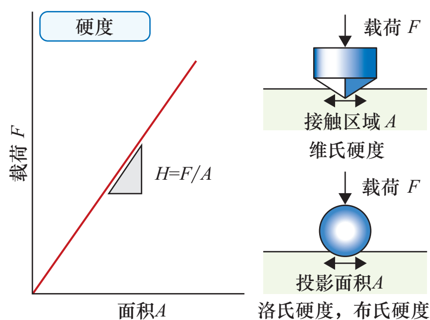


图 3.8 硬度是金刚石压头压入材料表面产生的力 F 与接触面积 A 的比值

这里硬度的单位为 MPa。除此之外，硬度有许多各式各样的单位，其中最常见的是维氏硬度 HV，单位为 kg/mm^2，其与 H 之间的关系为：

$$HV=\frac{H}{10}$$

将五种硬度表示方法与屈服强度对应起来，它们之间满足图 3.9 所示的转换关系。

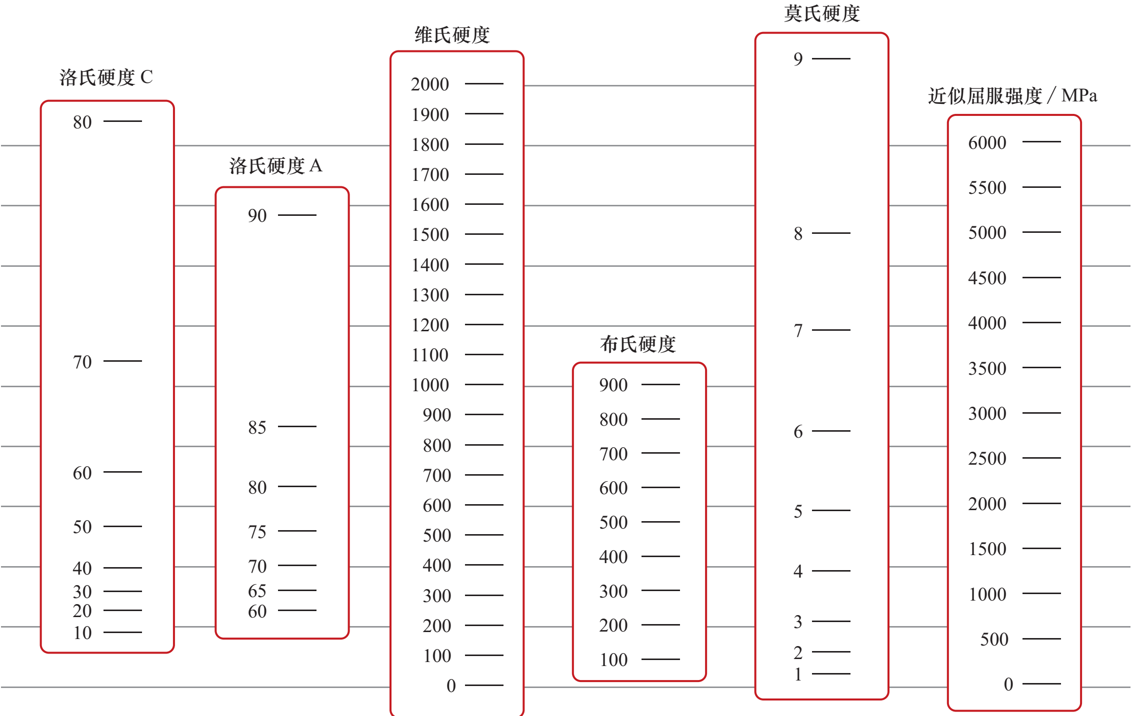


图 3.9 常用硬度表示方法之间的转化关系以及与屈服强度的关系

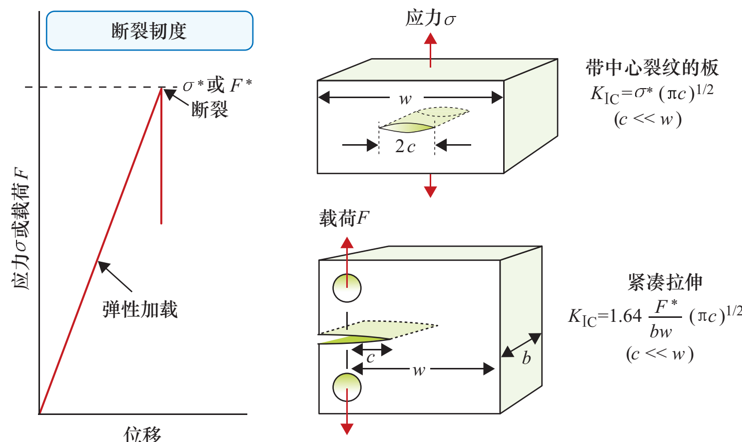


图 3.10 断裂韧度是用来衡量材料抵抗裂纹扩展的能力

（预设裂纹长度为 $2c$ 的试样，在应力为 σ^* 时发生断裂。利用公式 $K_{IC}=Y\sigma^*\sqrt{\pi c}$ 即可得出断裂韧度，其中 Y 为接近 1 的常数。）

4）冲击韧度（G_{IC}，单位：kJ/m^2）以及断裂韧度（K_{IC}，单位：$MPa\cdot m^{1/2}$ 或 $MN\cdot m^{1/2}$），代表材料抵抗裂纹扩展的能力。断裂韧度的测量方法（见图 3.10）：在预设裂纹长度为 $2c$ 的试样上施加载荷，记录下裂纹开始扩展时的拉应力值 σ^*。随后，K_{IC}可根据下式进行计算：

$$K_{IC}=Y\sigma^*\sqrt{\pi c} \tag{3.8}$$

G_{IC}的计算公式为：

$$G_{\mathrm{IC}}=\frac{K_{\mathrm{IC}}^{2}}{E(1+\nu)} \tag{3.9}$$

式中，Y 是几何形状参数，数值大小接近 1，取决于样品的几何形状；E 是弹性模量；ν 为泊松比。这种方式测得的 G_{IC} 和 K_{IC}，对于脆性材料（陶瓷、玻璃和大部分聚合物）来说较为准确。对于韧性材料，由于裂尖位置会形成塑性变形区，因此裂纹的扩展方式需考虑更多影响因素。不过，引用这种方法测得的 G_{IC} 和 K_{IC} 值，不失为一种评价材料的有效方法。

由硬度计算强度

某种钢的洛氏硬度为 50，试估计该材料的维氏硬度和屈服强度是多少？

答：由图 3.9 的表格可知，当洛氏硬度值为 50 时，维氏硬度 HV 约为 500，屈服强度约为 1700MPa。

5）损耗系数（η，无量纲数值），是指材料吸收振动能的能力（见图 3.11）。如果材料弹性加载至应力值 $\sigma_{\max}$，则单位体积中储存的弹性能为：

$$U=\oint_{0}^{\sigma_{\max}}\sigma\,\mathrm{d}\varepsilon\approx\frac{1}{2}\frac{\sigma_{\max}^{2}}{E}$$

对其先加载再卸载，则消耗的能量为：

$$\Delta U=\oint\sigma\,\mathrm{d}\varepsilon$$

由此可知，损耗系数为：

$$\eta=\frac{\Delta U}{2\pi U_{\max}} \tag{3.10}$$

式中，$U_{\max}$ 是应力达到最大值时所储存的弹性能。η 的大小通常取决于循环时间或频率。

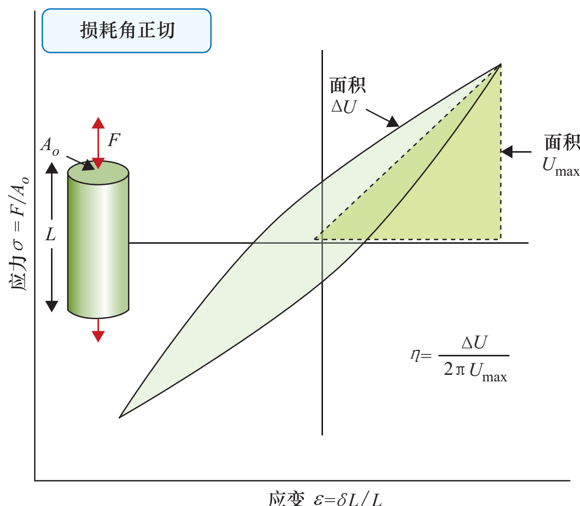


图 3.11 损耗系数 η 表征了材料应力应变循环下的能量耗散率

断裂韧度的应用

玻璃地板含有长度为 2μm 的微裂纹。已知玻璃的断裂韧度 $K_{\mathrm{IC}}=0.6\mathrm{MPa}\cdot\mathrm{m}^{1/2}$，当有人走在地板上时，应力值可达 30MPa。此时，该地板安全吗？

答：取 $Y=1$，根据式（3.8）可知，使 2μm 的裂纹（即 $c=10^{-6}\mathrm{m}$）在断裂韧度为 $K_{\mathrm{IC}}=0.6\mathrm{MPa}\cdot\mathrm{m}^{1/2}$ 的玻璃中发生扩展的应力值为：

$$\sigma_{c}=K_{\mathrm{IC}}/\sqrt{\pi c}=339\mathrm{MPa}$$

因此，地板是安全的。

其他衡量材料阻尼性能的参数有比阻尼容量 $D=\Delta U/U$、对数衰减率 Δ（自然振动连续振幅之比的对数）、应力应变的相位滞后 δ 以及共振因子 Q。当阻尼较小时（$\eta<0.01$），上述参数之间满足下述关系。

$$\eta=\frac{D}{2\pi}=\frac{\Delta}{\pi}=\tan\delta=\frac{1}{Q} \tag{3.11}$$

但是，当阻尼系数较大时，上述等式不再成立。

6）磨损，用于表征多个物体之间的相对滑动引起接触表面的材料损耗。从某种程度上说，磨损是可以量化的。固体间发生相对滑动时（见图 3.12），单位滑移距离引起的表面材料损耗量，称为磨损率（W，单位：m^2）。表面的抗磨损能力可以用 Archard 磨损系数 K_A（单位：MPa^{-1}）来表示，其定义式为：

$$\frac{W}{A}=K_AP \tag{3.12}$$

式中，A 是相对滑动的面积；P 是被施加的法向压力；K_A 的近似值将在第 4 章中给出，该值不是单个材料的性能，只有用于滑动副的性能时才有意义。

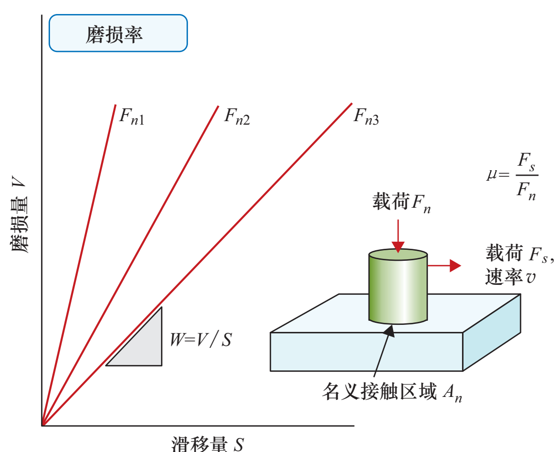


图 3.12　磨损量代表材料相对滑动造成的表面材料损失（抗磨损能力可以用正文中定义的 Archard 磨损系数 K_A 表示。）

损耗系数的应用

自振频率 $f=1000$Hz 的钟，其材料的损耗系数 $\eta=0.01$。敲击一次，它能响多长时间？如果材料换成损耗系数 $\eta=10^{-4}$ 的材料，又能响多长时间？（假定振幅 A 减为初始振幅的 1/100，则钟声停止。）

答：令 A 和 $A+dA$ 作为连续循环的振幅（dA 为负值）。由 $\lg\left(\frac{A}{A+dA}\right)=\Delta=\pi\eta$ 可知：

$$\frac{dA}{Ad\eta}=\frac{1}{10^{\pi\eta}}-1$$

对 n 次循环进行积分，得到 $\ln\frac{A}{A_0}=\left(\frac{1}{10^{\pi\eta}}-1\right)n$。其中，$A_0$ 是初始振幅。当 A 下降到 $0.01\times A_0$ 时，$\ln(A/A_0)=-4.6$，则 $n=4.6\left(\frac{10^{\pi\eta}}{10^{\pi\eta}-1}\right)$。因此，对于 $\eta=0.01$ 的材料，钟声持续的响声 $n=66$，时间 $n/f=66$ms；如果材料换成损耗系数 $\eta=10^{-4}$ 的材料，则钟声持续的响声 $n=6400$，时间为 6.4s。

磨损量计算

钢质滑块在干燥钢基体上反复滑动，频率 $f=0.2\text{Hz}$，幅值 $a=2\text{mm}$，法向压力 $P=2\text{MPa}$。钢与钢之间的 Archard 磨损系数 $K_A=3\times10^{-8}(\text{MPa})^{-1}$，试计算 $t=100\text{h}$ 后，滑块厚度会减薄多少？

答：100h，即 $t=3.6\times10^5\text{s}$，滑动距离 $d=4aft\text{m}$。厚度减薄量 x 为：

$$x=\frac{\text{减少的体积}}{\text{面积 }A}=4aftK_AP=3.5\times10^{-5}\text{m}=36\mu\text{m}$$

3.4.3 热性能

1）熔化温度 T_m 和玻璃化温度 T_g（单位：K 或℃），是两个基本的温度概念，它们直接关系到固体内部连接键的强度。晶体具有明显的熔化温度 T_m，非晶体则没有。玻璃化温度 T_g 反映了固体向黏性流体的转变。在工程设计中，最高工作温度 $T_{\max}$ 和最低工作温度 $T_{\min}$（单位均为：K 或℃）的引入也很有意义。前者是材料可以正常使用而不发生氧化、化学变化或大量蠕变的最高工作温度，后者是材料即将发生冷脆或使用不安全的最低工作温度。

2)（加热材料需要消耗能量）。比热容（单位：J/(kg·K)）是指 1kg 某种材料温度升高 1K 所吸收的能量。对于比热容的测量，通常是在恒压（大气压力）下进行，记为 C_p。但对于气体而言，更为常用的比热容测量是在一定体积下进行，故记为 C_v。对于气体，C_v 与 C_p 差异很大，但对固体而言两者的差异几乎可以忽略。比热容是通过量热法（见图 3.13）测定的，该方法也是测量玻璃化温度 T_g 的标准方法。将需要标定的能量（此处为电能）输入到已知重量的样品中，测得温度的升高量，代入公式——能量/(质量·温升)——就可以计算得到比热容。真正的量热计要复杂得多，但原理是一样的。

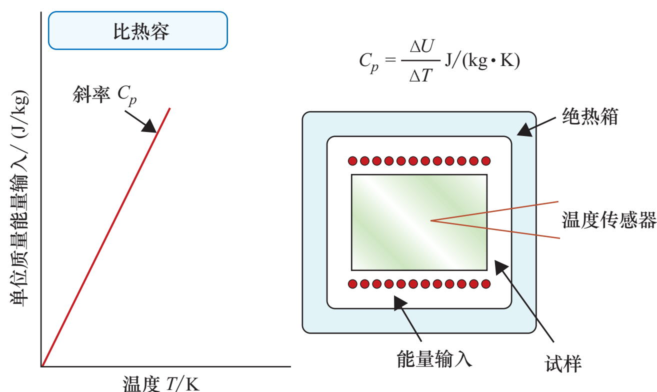


图 3.13 比热容——将 1kg 的材料温度升高 1℃所需要的热量

比热容的应用

边长为 100mm 的铜立方体从室温（20℃）加热到熔化温度，需要多少热量？

答：在附录 A 中可以查到材料的熔化温度 T_m、比热容 C_p 和密度 ρ。就铜而言，$T_m=1082℃$，$C_p=380\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$，$\rho=8930\text{kg/m}^3$。铜的质量 $\rho V=8.93\text{kg}$，温度变化 $\Delta T=1062℃$，所需能量为：

$$\rho VC_p\Delta T=3.6\text{MJ}$$

(1L 汽油的能量为 35MJ。)

3）导热系数 λ（单位：W/(m·K)），是在稳态传热条件（传热系统中各点的温度不随时间变化）下，热量在固体内部传导的速率。图 3.14 给出了导热系数的测量方法：将从高温面 T_1 流过整个材料至低温面 T_2 的热通量 q（单位：W/m²）记录下来，测量高温面和低温面之间的距离 X，基于傅里叶法则，可由下式计算出导热系数：

$$q=-\lambda\frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}X}=\lambda\frac{(T_1-T_2)}{X} \tag{3.13}$$

在实际操作中，这种测量并不容易实现，特别是对于低传导率的材料。不过，目前还是有很多可靠的数据可以查到。

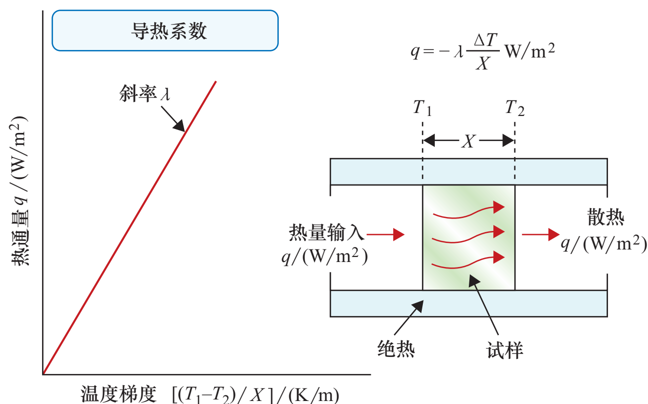


图 3.14 导热系数可用于测量温度梯度 dT/dX 引起的热通量

稳态热流

热交换器热交换面积 $A=0.5\text{m}^2$，热量从温度 $T_1=100℃$ 的流体传到温度 $T_2=20℃$ 的流体中。传热壁为铜板（铜的导热系数 $\lambda=350\text{W/(m·K)}$），壁厚 $X=2\text{mm}$，试问 1h 将有多少热量从一种流体流向另一种流体？

答：温度梯度 $\mathrm{d}T/\mathrm{d}X=80/0.002=40000℃/\text{m}$，1h 即 3600s，通过面积 A 的所有热量为：

$$Q=Atq=At\lambda\frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}X}=2.5\times10^{10}\text{J}=25\text{GJ}$$

对于瞬态热流，热通量主要取决于热扩散率 a（单位：m²/s）。它的定义为：

$$a=\frac{\lambda}{\rho C_p} \tag{3.14}$$

式中，ρ 是密度，C_p 是比热容。热扩散率可以通过测量热源关闭后的温度脉冲衰减来获得，也可以基于式（3.14）由 λ 计算得到。在时间 t 内，热扩散的距离 x 约为：

$$x\approx\sqrt{2at} \tag{3.15}$$

4）线膨胀系数 α（单位：K^{-1}，或更为方便的，微应变/℃或 10^{-6}/℃）。

大多数材料在受热时都会膨胀（见图 3.15）。单位温度改变引起的热应变可以通过线膨胀系数测得。如果材料是热各向同性的，则单位温度改变引起的体积膨胀率为 3α；如果是热各向异性的材料，体积膨胀率是主热应变的总和。

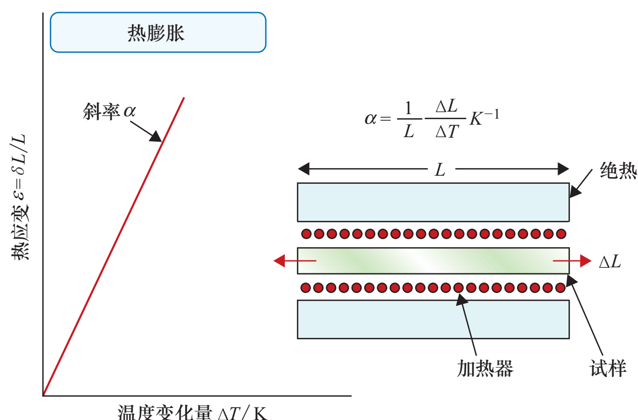


图 3.15 线膨胀系数为试样受热时单位长度的改变量

瞬态热流

将沸水倒入杯壁厚度 $X=3\text{mm}$ 的茶杯中，多长时间内，可以将其拿到桌上而不会烫手?(玻璃的导热系数 $\lambda=1.1\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$，密度 $\rho=2450\text{kg}/\text{m}^3$，比热容 $C_p=800\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$)

答：将以上数据代入式（3.14），得到玻璃的热扩散率 $a=5.6\times10^{-7}\text{m}^2/\text{s}$，将其代入式（3.15），得到的近似时间为：

$$t\approx\frac{X^2}{2a}=8\text{s}$$

热应力

将铝合金管紧固在混凝土建筑物的表面。天热时，建筑物的表面温度在太阳直射情况下达到 80℃，由于铝的膨胀率要大于混凝土的膨胀率，由此产生了热应力。如果最初铝合金管是在 20℃时夹紧混凝土，试问现在的应力值是多少?

答：取附录 A 中所给数值范围的平均值，铝合金的线膨胀系数 $\alpha=22.5\times10^{-6}/℃$，混凝土的线膨胀系数 $\alpha=9\times10^{-6}/℃$。铝合金管被紧固在混凝土表面，因此热应变的差为 $\Delta\alpha\Delta T=13.5\times10^{-6}\times60=8.1\times10^{-4}$。假定还在铝合金的弹性压缩范围内（弹性模量 $E=75\text{GPa}$），则应力为 $\Delta\alpha\Delta TE=61\text{MPa}$。该应力足以使较软的铝合金发生屈服。

5）抗热震性 ΔT_s（单位：K 或 C），表征材料进行快速淬火而不被损坏的最大温差。它和蠕变抗性是高温设计中的重要参数。材料在温度高于 $\frac{1}{3}T_m$ 或 $\frac{2}{3}T_g$ 的情况下受载时，会发生缓慢的、随时间变化的变形，即蠕变。蠕变设计是一门专业课。为此，本书中我们尽量避免材料在高于其最高工作温度 T_{max} 的温度条件下进行应用。对于聚合物来说，上述最高工作温度对应热变形温度。

3.4.4 电性能

1）电阻率（ρ_e，国际单位 Ω·m，常用单位 μΩ·m），是指两端承受单位电势差的单位立方体的电阻（见图 3.16）。不同材料的电阻率差别很大，优良导体的电阻率低至 10^{-8}Ω·m（即 1μΩ·cm），最好的绝缘体的电阻率达到 10^{16}Ω·m（即 10^{24}μΩ·cm）。电导率（κ_e，单位：S/m 或 $(\Omega\cdot m)^{-1}$）是电阻率的倒数。

电阻率和电阻

钨的电导率 $\kappa_e = 8.3\times10^6$S，试计算半径 $r = 100$μm，长度为 1m 的钨导线的电阻是多少？

答：钨的电阻率 $\rho_e = 1/\kappa_e = 1.2\times10^{-7}\Omega\cdot m$，则钨导线的电阻为：

$$R = \rho_e \frac{L}{\pi r^2} = 3.8\Omega$$

2）介电常数 ε_r，表示材料被极化的能力，它是一个无量纲数（见图 3.17）。当绝

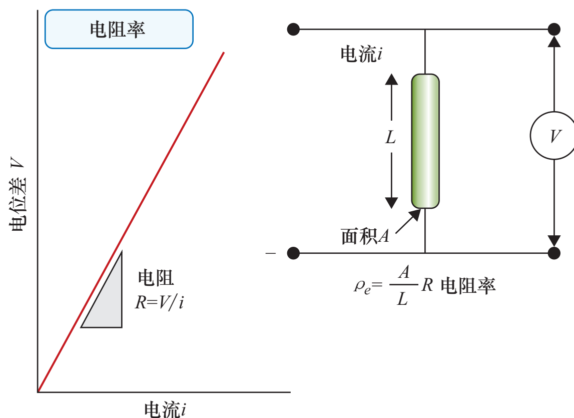


图 3.16 电阻率 ρ_e 可以通过电势梯度 V/L，除以电流密度 i/A 来计算获得（它与电阻 R 的关系为 $\rho_e = AR/L$。）

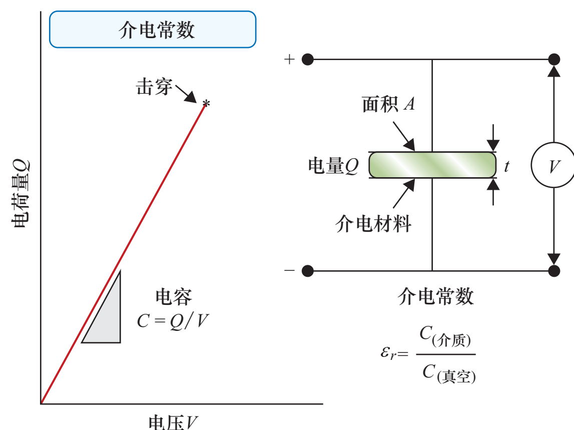


图 3.17 介电常数：绝缘体被极化的能力

缘体（非导电体）被置于电场中时会发生极化，表面会产生极化电荷中和电场内部的电荷。真空的介电常数为 1，在实际应用中，大多数气体的介电常数也可以认为是 1；低密度的泡沫类材料内部绝大部分是空气，故其介电常数接近 1，其他的大多数绝缘体的介电常数为 2～30。

ε_r 是用来衡量什么的呢？两块导电的平板，中间用绝缘体隔开，制成一个电容器。电容器储存电荷，电荷 Q（单位：C（库伦））与两板之间的电压 V（单位：V（伏特））成正比：

$$Q = CV \tag{3.16}$$

式中，C（单位：F（法拉））是电容。面积为 A 的空气平行板电容器的电容为：

$$C = \varepsilon_0 \frac{A}{t} \tag{3.17}$$

式中，ε_0 是真空电容率（8.85×10^{-12} F/m）。如果空气平行板电容器中间加入了绝缘体，那么电容就会因材料的极化而增大。极化产生的电场与原电场 E 相反，减弱了维持电荷稳定需要的电压 V，因此电容增大到一个新值：

$$C = \varepsilon \frac{A}{t} \tag{3.18}$$

式中，ε 是绝缘体的电容率，与 ε_0 单位相同。通常情况下我们不用电容率，而是更多地使用相对电容率或者介电常数 ε_r：

$$\varepsilon_r = \frac{C_{\text{介质}}}{C_{\text{真空}}} = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \tag{3.19}$$

由此，电容的表达式可转变为：

$$C = \varepsilon_r \varepsilon_0 \frac{A}{t} \tag{3.20}$$

充电时，储存在电容里的电能为：

$$\frac{1}{2}QV = \frac{1}{2}CV^2 \tag{3.21}$$

电容储存的能量值可以很大，以法拉为单位的“超级电容器”储存的能量足以驱动一辆混合动力汽车。

寄生电容

电容充放电的时间常数：

$$\tau = RC$$

式中，R 是回路的电阻。通电回路中的寄生电容（相邻导线或元件之间的电容）将会延缓整个回路的响应时间，选择什么样的材料将会使这个值最小呢？

答：选择电阻率较小的导体（使 R 最小）和介电常数较小的绝缘体，并将两者隔离使得 C 最小，从而得到最小的 τ。

极化会使电荷（电子或离子）或带偶极矩的分子在电场作用下发生微小位移。震荡电场的电荷有两种排布方式。如果没有损失的话，电荷的运动就像电流一样，与电压的相位差将会是 90°。在真实的绝缘体中，电荷的运动会消耗能量，就像电流流经电

阻一样，会造成一个相位差 δ（见图 3.18）。

3）损耗角正切 $\tan\delta$ 也被称为耗散系数 D，是损耗角的正切值。功率因数 P_f 是损耗角的正弦值。当损耗角 δ 很小时，对于所关注的材料来说，三者几乎是相等的。

$$P_f \approx D \approx \tan\delta \approx \sin\delta \tag{3.22}$$

就本书的研究内容而言，损耗系数 L 更为有用。它是介电常数与损耗角正切的乘积。

$$L = \varepsilon_r \tan\delta \tag{3.23}$$

损耗系数 L 用于衡量绝缘体在震荡场中消耗能量的能力。如果想选择相应的材料使得介质损耗最大化或最小化，那么损耗系数将是很好的参考依据。

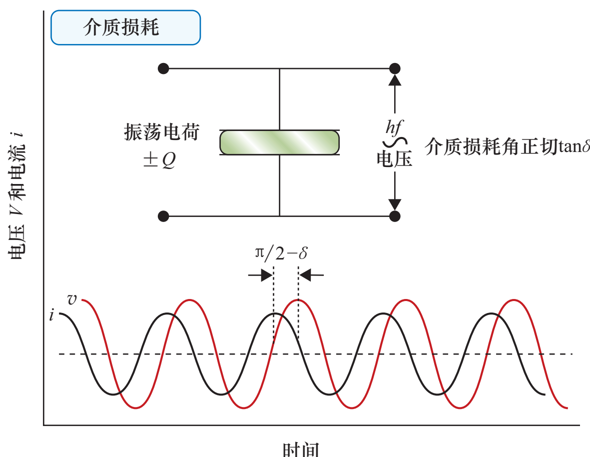


图 3.18 介质损耗

将绝缘体置于幅值为 E，频率为 f 的循环电场中，则能量 P 将会被消耗，电场也会相应地减弱。单位体积消耗的能量（W/m^3）为：

$$P \approx fE^2 \varepsilon \tan\delta = fE^2 \varepsilon_0 \varepsilon_r \tan\delta = fE^2 \varepsilon_0 L \tag{3.24}$$

式中，ε_r 是材料的介电常数，$\tan\delta$ 是损耗角正切。消耗的能量转化成热能，频率越高或场强越大，损耗系数 $L=\varepsilon_r \tan\delta$ 就越大，损失的能量和产生的热能就越大。有时材料加工中也会用到介电加热，例如聚合物的射频焊接。

介电加热

将一个尼龙零件置于场强 $E=10^4$V/m，频率 $f=10^{10}$Hz 微波谐振腔内 100s，尼龙的损耗系数 $L=0.1$，密度 $\rho=1130\text{kg/m}^3$，比热容 $C_p=1650\text{J/(kg·K)}$，假设没有热损失，零件的温度将会是多少？

答：电场生热 $Q=Pt=fE^2\varepsilon_0 Lt=8.85\times10^7\text{J/m}^3$，单位体积的尼龙的比热容 $C_p\rho=1.86\times10^6\text{J/(m}^3\cdot\text{K)}$，则升高的温度 ΔT 为：

$$\Delta T = \frac{fE^2\varepsilon_0 Lt}{C_p\rho} = 47.6℃$$

4）击穿电压（单位：MV/m），电介质在足够强的电场作用下将失去其介电性能成为导体，称为电介质击穿，这时所对应的电压称为击穿着电压。其测量方法为：将

匀速增大的 60Hz 交变电压施加在材料的两个面之间，直到击穿。材料的击穿电压从 100 万 V/m~1 亿 V/m 不等（单位：MV/m）。

3.4.5 光性能

所有材料都允许一定量的光线穿过，只是对金属来说，透过量非常少。光在物质中的传播速度 v，总是小于在真空中的速度 c。因此，一束光以任意角度 α 射到材料表面，将以折射角 β 进入材料，其折射率 n（无量纲）即：

$$n=\frac{c}{v}=\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} \tag{3.25}$$

在相同的频率下，折射率的数值与介电常数有关：

$$n\approx\sqrt{\varepsilon_r}$$

折射率主要取决于波长，即光的颜色。材料的密度越大，介电常数越大，其折射率就越大。当 $n=1$ 时，任意光线都将射入材料；当 $n>1$ 时，部分光线就会被反射。如果表面是光滑抛光的，则以光束的形式发生反射；如果表面是粗糙的，则反射为漫反射。反射率 R 与折射率的关系是：

$$R=\left(\frac{n-1}{n+1}\right)^2\times 100 \tag{3.26}$$

当 n 增大时，R 的值可以接近 100%。

3.4.6 生态性能

内涵能（单位：MJ/kg）即从矿物和原材料中提取 1kg 该材料所需消耗的能量。CO_2 排放量（单位：kg/kg）即生产 1kg 该材料向大气中排放的 CO_2 量。本书第 15 章将详细介绍生态性能的相关内容。

3.5 本章小结

工程材料分为六大类：金属、陶瓷、玻璃、聚合物、弹性体和复合材料（复合了两种或两种以上材料的性质）等。每类材料都有共性的地方，如陶瓷和玻璃是硬度高、耐腐蚀的脆性材料；金属是韧性好，导电性和导热性都很好的塑性材料；聚合物是密度小、易成形的绝缘体材料；弹性体可以承受较大的弹性应变。这些共性使得材料分类很有用，但是在设计中，我们要突破分类的限制，并将材料名称想象为特定性能简表的标签。在接下来的几章中我们会将这些性能简表与设计所需的理想性能简表进行对比，来指导我们选择材料。为了这个目标，在本章中给出了一些与热力学设计相关的材料性能定义。在下一章中，我们研发了一种方法来展示这些材料性能，从而使材料选择的自由度最大化。

3.6 扩展阅读

材料性能的定义可以在大量的工程材料书籍中找到。部分参考书籍列举如下：

1）Ashby，M. F.，& Jones，D. R. H.（1996）. *Engineering materials 1，an introduction to properties*，

applications and design (3rd ed.). Elsevier-Butterworth-Heinemann, ISBN 0-7506-6380-4.

材料介绍，以设计为导向。

2) Ashby, M. F. , Shercliff, H. R. , & Cebon, D. (2010). *Materials: engineering, scienece, processing and design* (2nd ed.). Butterworth-Heinemann, ISBN 978-1-85617-895-2.

一本基础书籍，通过材料属性图表的方式来介绍材料，并基于案例形成相应的材料选择方法。

3) Askeland, D. R. , & Phulé, P. P. (2016). *The science and engineering of materials* (5th ed). Thomson, ISBN 0-534-55396-6.

被广泛使用的一本书籍。

4) *ASM Handbooks*, *Vol*. 8 (2004). *Mechanical testing and evaluation*. ASM International.

在线付费资源，详细描述了金属和陶瓷的检验程序。

5) *ASM Engineered Materials Handbook* (2004). *Testing and characterization of polymeric materials*. ASM International.

在线付费资源，详细描述了聚合物的检验程序。

6) *ASTM Standards*, *Vol*. 08. 01 and 08. 02 (1998). *Plastics*, *Vol*. 04. 02 (1989). *Concrete*, *Vols*. 01. 01 to 01. 05 (1990). *Steels*, *Vol*. 02. 01. *Copper alloys*, *Vol*. 02. 03. *Aluminum alloys*. *Vol*. 02. 04. *Nonferrous alloys*, *Vol*. 02. 05. *Coatings*, *Vol*. 03. 01. *Meatals at high and low temperatures*, *Vol*. 04. 09. *Wood*, *Vol*. 09. 01. and 09. 02. American Society for Testing Materials, ISBN 0-8031-1581-4.

美国材料与试验协会的一系列材料测试标准。

7) Budinski, K. G. , & Budinski, M. K. (2010). Engineering materials, properties and selection (9th ed.). Prentice Hall, ISBN 978-0-13-712842-6.

一本享有盛誉的材料书籍，涉及材料属性和工艺。

8) Callister, W. D. (2010). *Materials science and engineering*, *and introduction* (8th ed.). John Wiley, ISBN 978-0-470-41997-7.

一本受尊敬的材料书籍，目前已是第 7 版，在北美洲被广泛用于材料教学的教材。

9) Charles, J. A. , Crane, F. A. A. , & Furness, J. A. G. (1997). *Selection and use of engineering materials* (3rd ed.). Butterworth-Heinemann, ISBN 0-7506-3277-1.

从材料科学的角度进行材料的选择。

10) Dieter, G. E. (1999). *Engineering design*, *a materials and processing approach* (3rd ed.). McGraw-Hill, ISBN 9-780-073-66136-0.

一本受人尊敬的书籍，注重于技术设计中材料与工艺的定位。

11) Farag, M. M. (2008). *Materials and process selection for engineering design* (2nd ed.). CRC Press, Taylor and Francis: ISBN 9-781-420-06308-0.

从材料科学的角度进行材料的选择。

12) Shackelford, J. F. (2009). *Introduction to materials science for engineers* (7th ed.). Prentice Hall, ISBN 978-0-13-601260-3.

一本享有盛誉的材料书籍，偏向设计多一些。

材料性能图

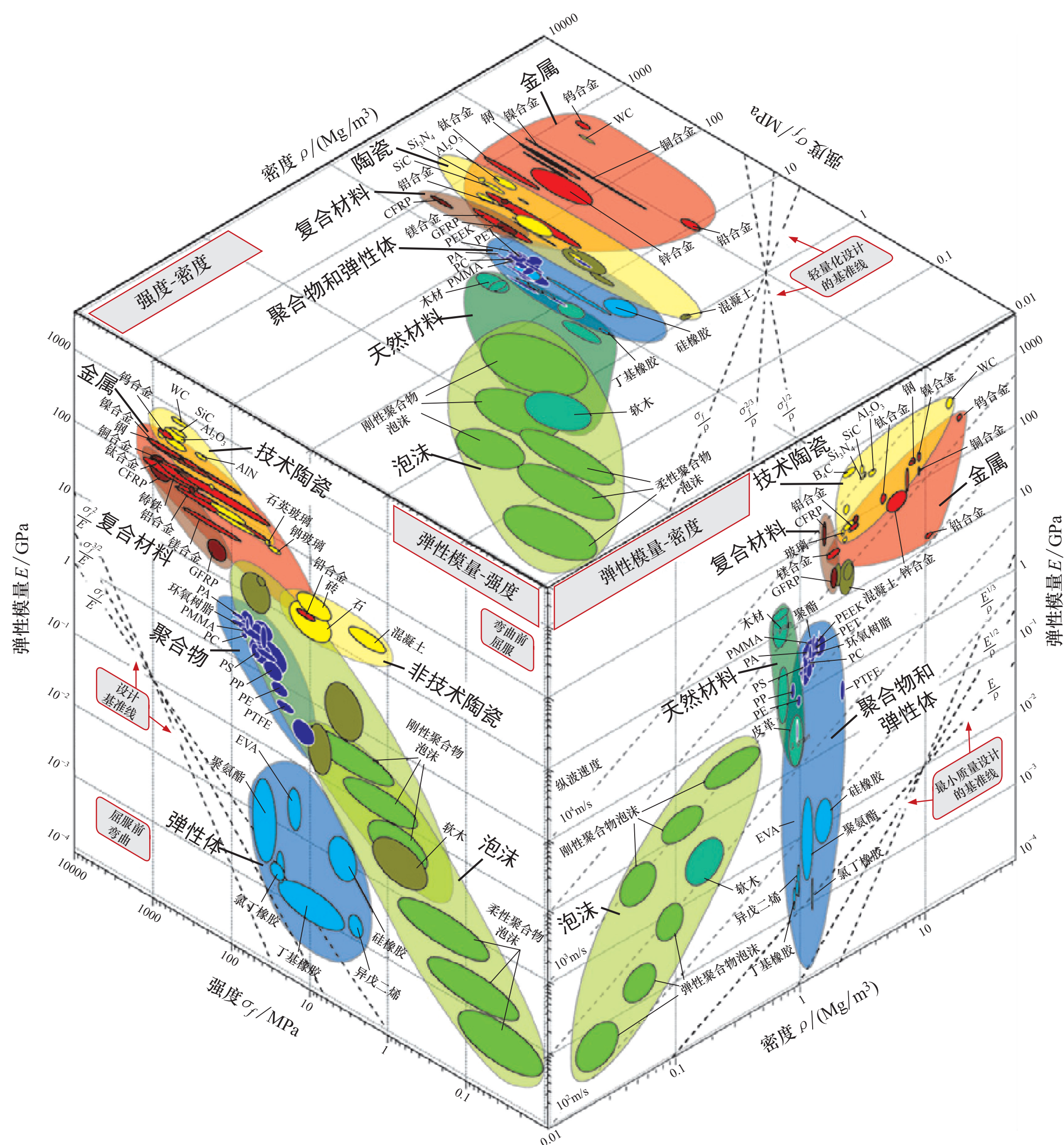


图 4.0　材料性能空间的三维切片：弹性模量—强度—密度切片

4.1 引言

材料性能决定其服役表现，因此我们需要一种考察材料性能的方法，以便找到满足设计要求的性能参数值。材料的某一性能可以通过排序表或柱状图来展示出来，但是零部件的服役表现并非一种材料性能所能决定的，通常是多种材料性能同时起作用。例如，轻量化条件下对刚度的需求，抗腐蚀条件下对导热性的需求，或者韧性条件下对强度的需求。基于上述思想，如果以材料的两种不同性能为坐标轴绘制图表，就可映射出不同材料类别以及单个材料所对应的性能场。

上述方法得到的图表很实用，不仅将大量的信息压缩成一个紧凑、易查询的形式，而且显示出了材料性能之间的相互关系，从而有助于检验和评估数据。此外，正如后续章节所描述的那样，该表还是一个非常重要的工具，可以用来选择材料、探究加工工艺对于性能的影响、论证形状对结构功效的提升，并且给出将来材料发展的方向。

材料选择图表的基本原理将在本章 4.2 节作简要描述，4.3 节中将详细介绍这些图表。没有必要看完所有图表，但深入分析这些图表，做到能快速解读图表中的信息且掌握其中的设计指导原则，会对后续材料选择工作非常有帮助。鉴于此，当使用某一种特定图表时，应当了解其背景，才能确保正确解读图表。

正如序言所提，这些图表在用于教学目的时不涉及版权问题。

4.2 探究材料性能

每一种工程材料的性能值都有其特定的范围，有些性能值的范围很大，超过 5 个数量级甚至更多。对于这种大范围数值的展示，我们可以借鉴如图 4.1 所示的例子，采用柱形图来描述弹性模量的变化。每一条柱子代表一种材料，其长度代表材料在不同形式下表现出来的模量范围。材料被划分为不同类别，每一类材料都具有一个特定

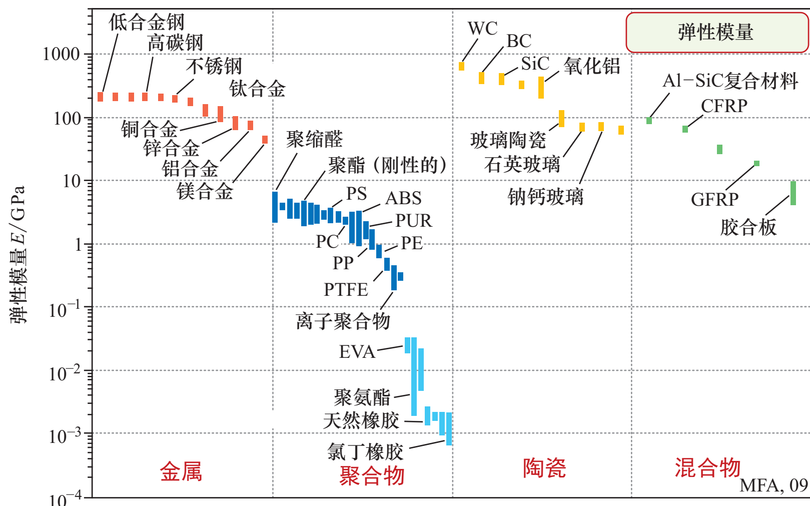


图 4.1 固体系列材料的模量柱形图（每一条柱子显示的是一种材料的弹性模量值范围，其中部分做了标注。）

的性能范围。金属和陶瓷具有很高的模量，而聚合物的模量较低，复合材料的模量变化范围较大。不同种类材料的模量变化范围非常大，数量级跨越 10^6，因此使用对数坐标来绘图。

图 4.2 是以材料的两种性能（弹性模量 E 和密度 ρ）为坐标轴形成的图表，基于这种方式能展示的信息更多。坐标轴的取值范围会涵盖所有的材料，从最轻的泡沫到最硬最重的金属。由于范围很大，同样要采用对数坐标来表示。从图中可以看出，同一系列材料（例如聚合物）的数据集中在一起，且单系列材料的性能范围要远小于总的性能范围。同一系列材料的数据往往形成一个性能区间，这在图中很容易看到。从图 4.3 给出的弹性模量—密度关系图中可以看到，各系列材料对应的性能区间显而易见。在每个区间内，白色的“气泡”代表了不同的类和子类的性能区间。

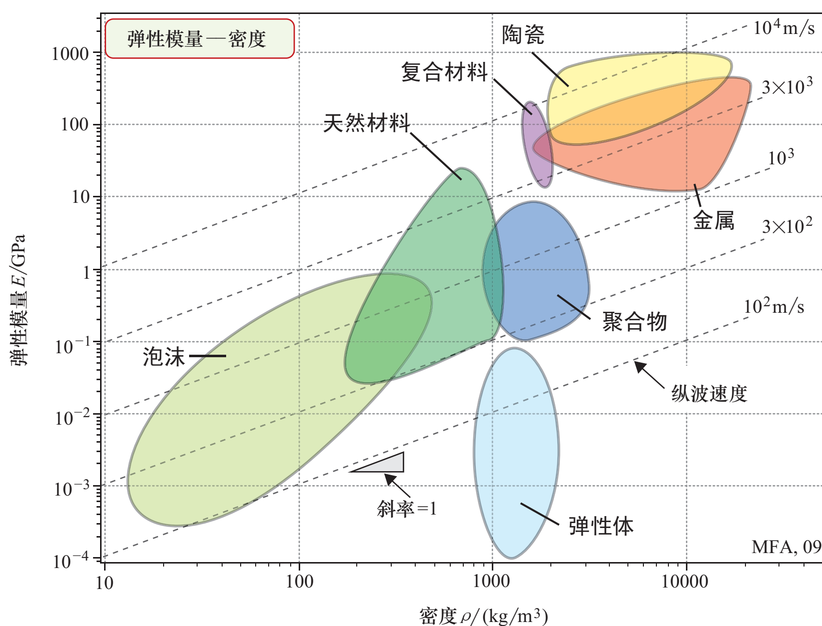


图 4.2 材料性能图的基本思想：用对数坐标描述弹性模量 E 和密度 ρ 的关系

（每类材料占据各自特定的区域，等高线对应的是纵波速度 $v=(E/\rho)^{1/2}$。）

这是一种描绘数据的有效方式，形式很简单，配合合适的坐标轴和尺度，还可以在图上添加更多的信息。固体中的声速取决于 E 和 ρ，例如纵波速度 v 为

$$v=\left(\frac{E}{\rho}\right)^{\frac{1}{2}}$$

或取对数：

$$\lg E=\lg\rho+2\lg v$$

若 v 取固定值，上式在图 4.2 和 4.3 中可以表征为一条斜率为 1 的直线。这样，我们可以在图中增加固定波速的等高线。它们是一系列平行的对角线，将具有相同纵波速度的材料关联了起来。对于所有的图表，都能呈现类似的基本关系。此外，“材料指标”这样的设计优化参数，同样可以在这类图表上以等高线的形式呈现出来（见第 5 章）。

材料具有多种力学性能和热性能，其中大约有 30 种在材料表征及其工程设计中起着非常重要的作用。表 3.1 列出了这些性能，包括密度、弹性模量、强度、硬度、冲击韧度、导热系数和电导率、热膨胀系数以及比热容。表 4.1 列举了不同系列不同类别材料的相关性能数据。本表在图 3.1 六大系列材料的基础上进行了扩展，将泡沫和

天然材料从聚合物中单列了出来，并将低强度非技术陶瓷（例如混凝土和砖）和高强度技术陶瓷（例如碳化硅）做了区别对待。针对每一系列材料，图表的绘制以一组代表性材料的数据来完成，既要涵盖该类材料的完整性能范围，又要包含最常见和广泛使用的材料。如此这般，某一系列材料的覆盖区域不仅包含表 4.1 中所列材料的数据，还包含该系列材料其他成员的数据。

表 4.1 材料系列和类别

系列	类别	简称/缩写
金属（金属和工程用合金）	铝合金	铝合金
	铜合金	铜合金
	铅合金	铅合金
	镁合金	镁合金
	镍合金	镍合金
	碳素钢	碳素钢
金属（金属和工程用合金）	不锈钢	不锈钢
	锡合金	锡合金
	钛合金	钛合金
	钨合金	钨合金
	铅合金	铅合金
	锌合金	锌合金
陶瓷、技术陶瓷（能承受载荷的高质量陶瓷）	氧化铝	Al_2O_3
	氮化铝	AlN
	碳化硼	B_4C
	碳化硅	SiC
	氮化硅	Si_3N_4
	碳化钨	WC
陶瓷、非技术陶瓷（结构疏松陶瓷）、玻璃	砖	砖
	混凝土	混凝土
	钠钙玻璃	钠钙玻璃
	硼硅玻璃	硼硅玻璃
	石英玻璃	石英玻璃
	玻璃陶瓷	玻璃陶瓷
聚合物（工程用热塑性塑料和热固性塑料）	ABS 塑料	ABS
	醋酸纤维素	CA
	离子交联聚合物	离子交联聚合物
	环氧树脂	环氧树脂
	酚醛塑料	酚醛塑料
	聚酰胺（尼龙）	PA
	聚碳酸酯	PC
	聚酯	聚酯

（续）

系列	类别	简称/缩写
聚合物（工程用热塑性塑料和热固性塑料）	聚醚醚酮	PEEK
	聚乙烯	PE
	聚对苯二甲酸乙二醇酯	PET 或 PETE
	聚甲基丙烯酸甲酯	PMMA
	聚甲醛	POM
	聚丙烯	PP
	聚苯乙烯	PS
	聚四氟乙烯	PTFE
	聚氯乙烯	PVC
弹性体（工程橡胶，天然和人工合成）	丁基橡胶	丁基橡胶
	乙烯-醋酸乙烯酯共聚物	EVA
	异戊二烯	异戊二烯
	天然橡胶	天然橡胶
	聚氯丁二烯（氯丁橡胶）	氯丁橡胶
	聚氨酯	PU
	硅橡胶	硅橡胶
混合物：复合材料	碳纤维增强复合材料	CFRP
	玻璃纤维增强塑料	GFRP
	铝基碳化硅颗粒增强复合材料	Al-SiC（铝碳化硅）
混合物：泡沫	软质聚合物泡沫塑料	软质泡沫塑料
	硬质聚合物泡沫塑料	硬质泡沫塑料
混合物：天然材料	木塞	木塞
	竹子	竹子
	木头	木头

下一节的图表将展示各种材料各类性能值的范围。有时候值的变化非常小，例如铜的模量，受到其纯度、织构和其他相关特征的影响，其变化仅仅偏离它的平均值几个百分点。不过，有时候值的范围变化又会很大，由于受到成分及加工硬化和热处理的影响，金属的强度可以偏差 100 倍，甚至更多。结晶度和交连度极大地影响了聚合物的模量；孔隙度影响陶瓷的强度。这些对结构敏感的性能在图表中表现为细长覆盖区域。

4.3 材料性能图

4.3.1 弹性模量—密度图

弹性模量和密度是两种最常见的性能。钢是硬的，橡胶是软的——这是由弹性模

量决定的；铅是重的，木塞能浮于水面——这是由密度决定的。图 4.3 显示的是工程材料的弹性模量 E 和密度 ρ 的取值范围。每一系列材料的数值在图表中聚集在一起，可用一个彩色区域包围起来。在所有的图表中都会出现类似的“彩色区域”，与表 4.1 的主标题相对应。

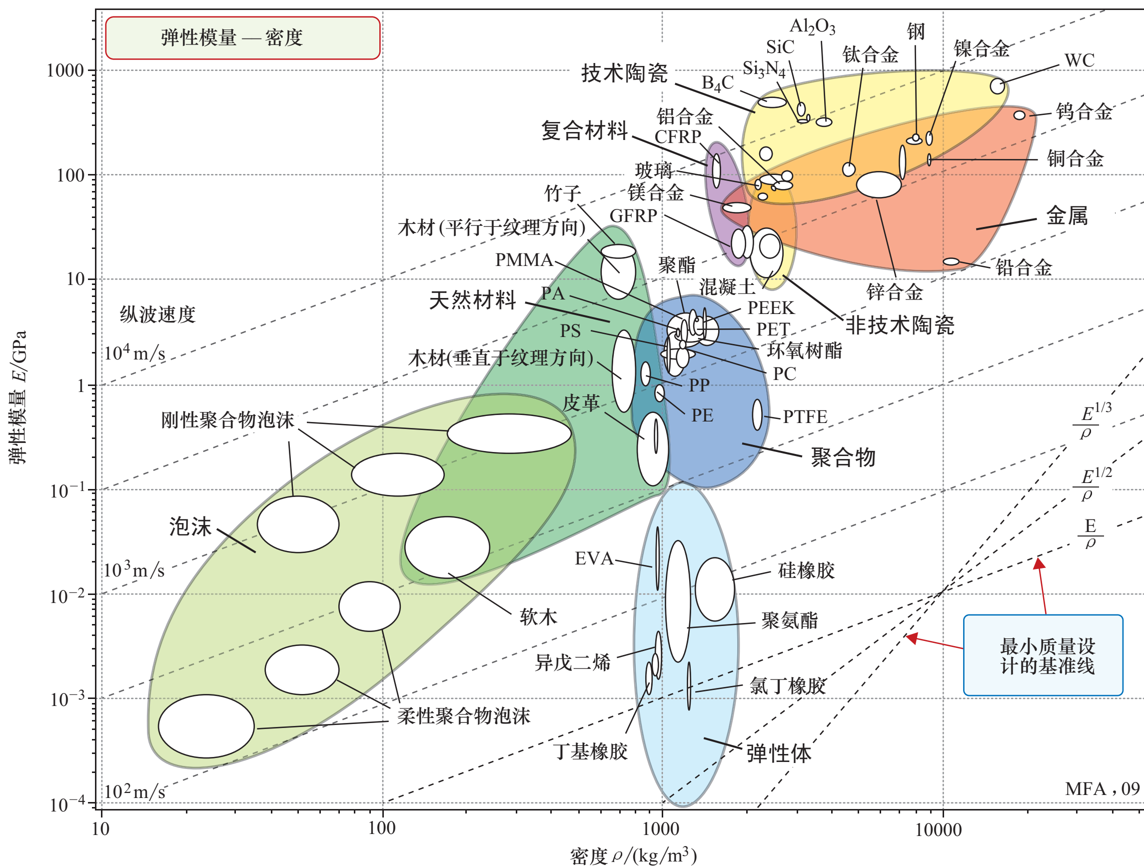


图 4.3 弹性模量 E 与密度 ρ 的关系图（深色覆盖区域代表一类材料的数据。对角等高线对应的是纵波速度。对应 E/ρ，$E^{1/2}/\rho$ 和 $E^{1/3}\rho$ 的基准线有助于选出合适的材料，用于最小重量目标下的挠度设计。）

注：图中材料的简称见表 4.1。

固体的密度取决于原子或离子的质量、体积及其组合的方式。原子的尺寸变化不大，绝大多数原子的体积在 $2\times10^{-29}\,\mathrm{m}^3$ 的两倍之内。填充分数变化同样不大，也是两倍左右。密堆积的填充分数为 0.74，像金刚石型结构这样的开放式网络的填充分数为 0.34。密度的变化主要由原子质量的变化所引起。氢的原子质量为 1，而铀的原子质量是 238。金属的密度高主要是因为其原子质量大，且排布紧密；聚合物的密度低是因为它们主要由碳（原子质量为 12）和氢（原子质量为 1）以一种开放的非晶体或晶体结构构成；绝大多数陶瓷的密度比金属低，是因为它们由原子质量较轻的氧、氮或碳原子构成。即使最轻的原子，采用最开放的方式进行组合，在固态下的密度约 $1000\,\mathrm{kg/m^3}$，和水的密度相同。由于内部含有大量的孔隙，泡沫的密度比这更低。

绝大多数材料的弹性模量取决于两个因素，即键的刚度和单位体积内键的数量。键就像弹簧，也有弹性常数 S（单位：N/m）。弹性模量 E 与弹性常数 S 的关系如下：

$$E=\frac{S}{r_0} \tag{4.1}$$

式中，r_0 是原子的尺寸（r_0^3 是平均的原子或离子体积）。弹性模量的范围很大程度上由 S 的范围决定。共价化合物刚度较大（$S=20\sim200\text{N/m}$）；金属和离子略小（$S=15\sim100\text{N/m}$）。金刚石的弹性模量非常高是因为碳原子很小，连接密度较大，而且它的原子由很强的共价“弹簧”连接（$S=200\text{N/m}$）。金属具有高弹性模量，因为密堆积产生很高的键密度，且键的强度很高，虽然没有金刚石的键那么强。聚合物既包含较强的金刚石类的共价键，也包含较弱的氢键或范德华键（$S=0.5\sim2\text{N/m}$）。当聚合物变形时，弱键伸长导致低弹性模量。

即便将大原子（$r_0=3\times10^{-10}\text{m}$）由最弱的键（$S=0.5\text{N/m}$）进行连接，其弹性模量也有

$$E=\frac{0.5}{3\times10^{-10}}\approx1\text{GPa} \tag{4.2}$$

对于真正的固体来说，这个值是下限，但图表中显示有很多材料的弹性模量比这个低。这些材料不是弹性体就是泡沫。弹性体的弹性模量低，是因为当它们的玻璃化温度 T_g 比室温低时，次级键会熔化，只剩下与紊乱的长链分子相关联的弱熵的恢复力。泡沫弹性模量较低是因为当材料加载时，细胞壁很容易弯曲。更多相关信息见本书第 11 章。

图表显示工程材料的弹性模量跨越 7 个数量级，从 0.0001GPa（低密度泡沫）到 1000GPa（金刚石）；密度跨越两千倍，从 $0.01\sim20\text{Mg/m}^3$。陶瓷系列的刚度最高，金属相对小些，但都大于 10GPa。相反的，聚合物的弹性模量都集中在 $0.8\sim8\text{GPa}$ 之间。

使用对数坐标可以使很多的信息呈现在图表中。正如上一节所述，材料的弹性波的波速以及该材料构成的零部件的固有频率都与 $(E/\rho)^{1/2}$ 成比例，其数量关系可以在图表上以等高线的方式标注，记为纵波速度，其值从小于 50m/s（柔软的弹性体）到略超过 10^4m/s（硬陶瓷）。由于密度很低，铝和玻璃的弹性模量较低，但尽管如此，波的传播很快。有人可能认为泡沫中的波速较低是因为其弹性模量较低，但是其低密度几乎可以补偿由低弹性模量导致的波速下降。在木制品中，横穿晶格方向的波速较低，但是沿着晶格方向则很高，大致与钢相同，这一原理常用于乐器设计。

工程设计中有很多这样的问题，即面向轻量化应用选择材料，该图表在这方面是非常有用的。图 4.3 给出了三种常用几何构型相对应的基准线。第 5 章和第 6 章将详细介绍如何借助该图表进行选材，实现最小重量目标下的刚度设计。

材料性能调查

哪一类合金最轻？哪一类最重？哪一类刚度最好？哪一类刚度最差？

答：图 4.3 显示最轻的材料类别是镁合金，最重的是钨合金，刚度最好的是钨合金，最差的是铅合金。

本章所有类似图 4.3 的图表都可以用来进行快速对比。

声速比较

哪些金属的纵波速度为 300m/s?

答：图 4.3 显示，锌合金、铜合金和钨合金的纵波速度都接近 300m/s。

4.3.2 强度—密度图

固体弹性模量的定义明确且具有精确的值，强度却不是。图 4.4 所描绘的是强度与密度的关系图。

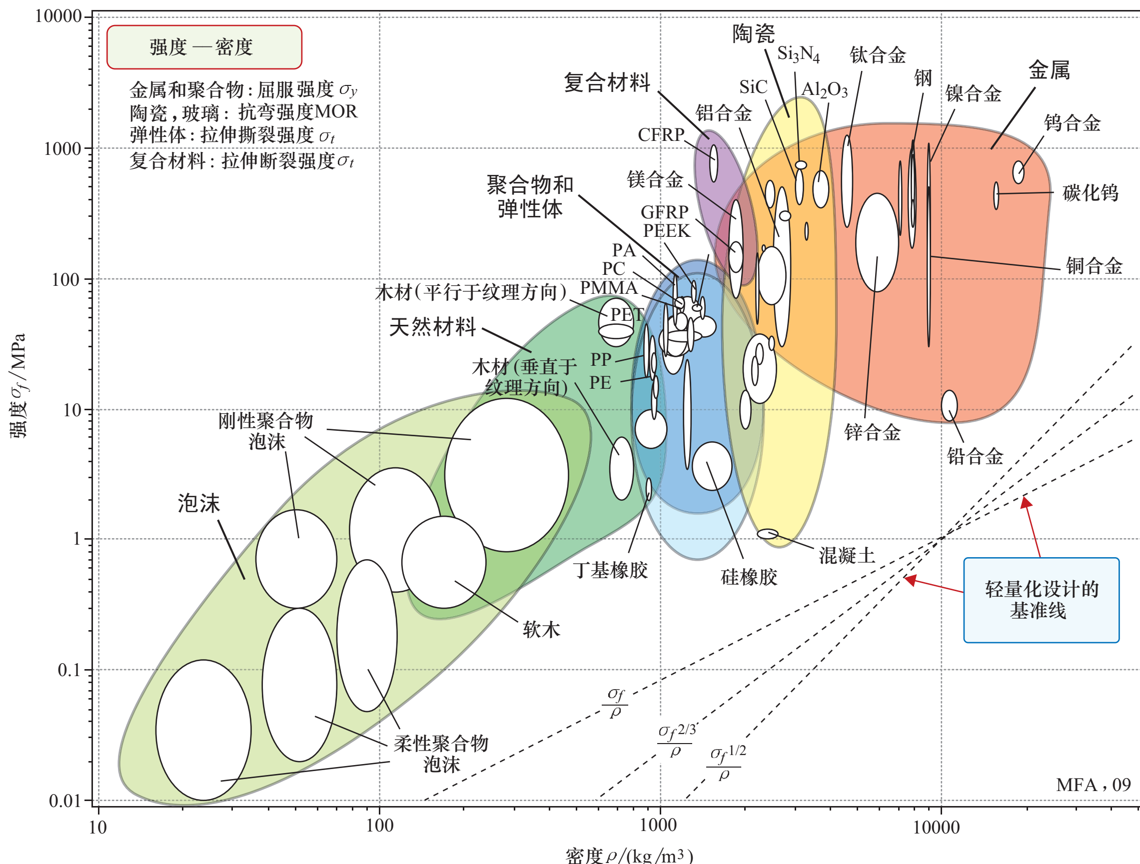


图 4.4 强度 σ_f 与密度 ρ 的关系图（对应 σ_f/ρ，$\sigma_f^{2/3}/\rho$ 和 $\sigma_f^{1/2}/\rho$ 的基准线有助于选出合适的材料，用于最小重量目标下的屈服强度设计。）

在本书第 3 章 3.4 节中，我们给出了一些强度的定义。对于金属和聚合物，强度是指屈服强度。由于不仅包含经加工过的或发生加工硬化的材料，还包含经退火软化的材料，上述两个材料系列的屈服强度变化范围很大。对于脆性陶瓷，强度是指弯曲强度，比抗拉强度略大，但比抗压强度小很多。对于陶瓷而言，其抗压强度要比抗拉强度大 10~15 倍。对于弹性体，强度特指抗撕裂强度；对于复合材料来说，强度是指抗拉强度（由于纤维屈曲，抗压强度比抗拉强度要小 30%左右）。尽管不同的失效机理隐含其中，但为了便于比较，我们将统一采用符号 σ_f 来表征所有材料的强度。

工程材料的强度范围，如同其弹性模量一样，也跨越几个数量级，小至 0.01MPa（用于包装和吸能系统的泡沫），大至 10^4MPa（用于金刚石砧的金刚石）。要想理解为何跨度范围这么大，唯一的也是最重要的概念就是晶格阻力或者说是佩尔斯应力，一种结构中固有的塑性剪切抗力。晶体的塑性剪切会引起位错的移动。纯金属之所以很软，是因为非局部金属键极少阻碍位错运动，而陶瓷较硬是因为其局部共价键和离子键（当结构发生剪切时，这些键必须被打破并重组）限制了位错的移动。在非晶态固体中，当聚合物链之间相对滑移或玻璃结构中的分子族发生剪切时，该流动过程的每一个单元步都需要消耗能量。非晶态固体的强度与晶格阻力强度有相同的起源。因此，如果单元步中有强键的破坏（如在非有机玻璃中），材料强度高；如果仅有弱键的破坏（如聚合物中的范德华键），材料的强度就很弱。断裂失效就是这样情况，由于晶格阻力或非晶态效应过大导致原子分离（破裂）发生。

当晶格阻力较低时，可以在材料中引入滑移障碍以达到强化的目的。对于金属，强化可以通过增加合金元素、颗粒、晶界和其他位错（“加工硬化”）的方式得以实现。对于聚合物，可以通过交联或重新定位分子链，使强共价键和弱范德华键在其发生变形时破裂，从而实现强化。另一方面，当晶格阻力较高时，进一步硬化是没有必要的，反而需要考虑如何抑制断裂的发生。

在进行轻质高强度设计时，上述图表可用于指导材料选择。对于筋、柱、梁和平板的轻量化设计，以及运动部件在考虑惯性力作用下的屈服强度设计，图中的基准线对于材料选择十分重要。相关应用将在第 5 章和第 6 章中进行详述。

轻质高强度材料

哪种材料的强度 σ_f 与密度 ρ 的比值最大？利用图 4.4 找出。

答：σ_f/ρ 值最大的材料是位于图 4.4 左上角的材料。该比值在图中可表示成斜率为 1 的直线。在右下角有三条基准线，其中有一条斜率也是 1。比值最高的材料为与此线垂直距离最远的材料。碳纤维复合材料（CFRPs）符合此标准。

高强度固体材料

利用图 4.4 的强度—密度关系图，找到三类强度高于 1000MPa 的材料。

答：钢、钛合金和碳纤维复合材料这三类均包含强度高于 1000MPa 的材料。

4.3.3 弹性模量—强度图

高强钢可以制成很好的弹簧，橡胶也可以。这两种完全不同的材料怎么会适用于同一项任务呢？图 4.5 将帮助我们来回答这个问题以及其他类似问题。这张图表描述了弹性模量 E 和强度 σ_f 的关系，它是最有用的图表之一。强度的定义与之前的描述一致，即金属和聚合物的强度指屈服强度，陶瓷的强度是指弯曲强度，弹性体的强度指抗撕裂强度，复合材料和木制品的强度是指抗拉强度。上述强度均用符号 σ_f 表示。屈服应变或断裂应变，σ_f/E（即材料线弹性行为终止时的应变值）的等高线为相互平行的直线族。

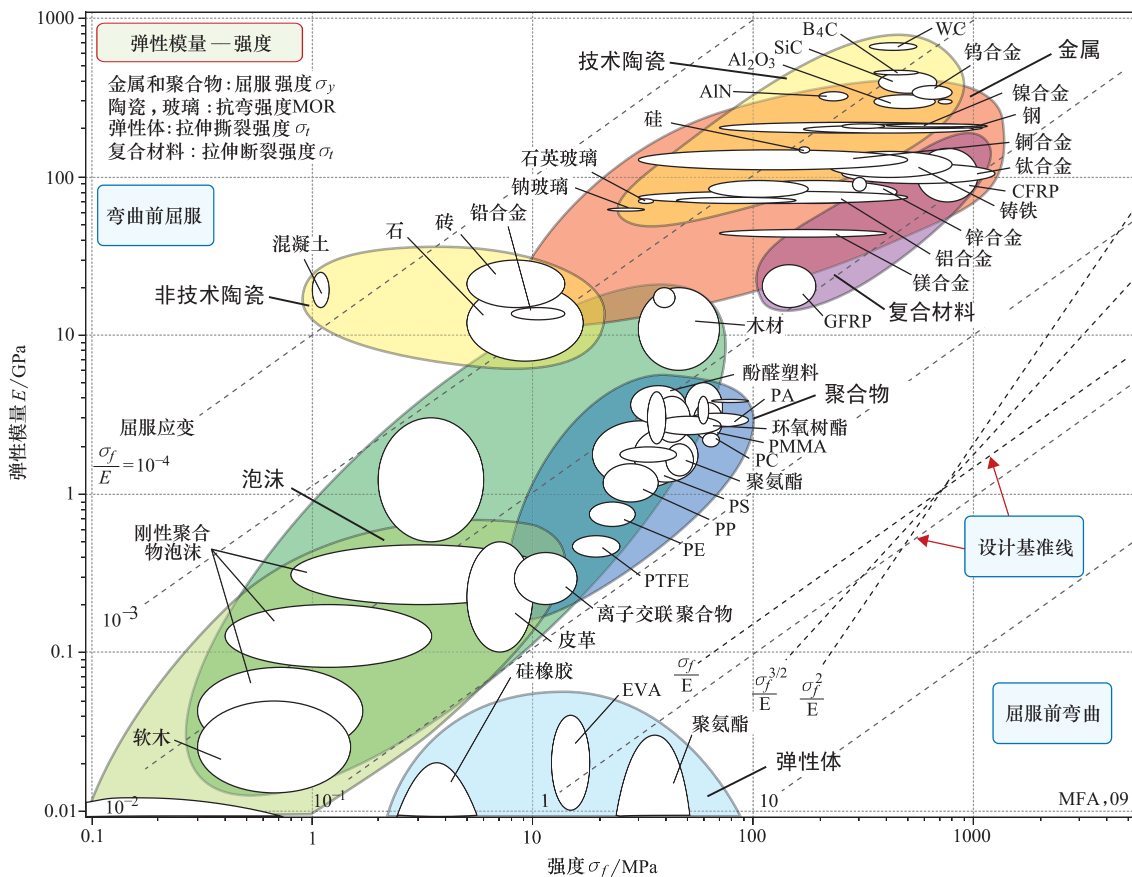


图 4.5 弹性模量 E 与强度 σ_f 关系图（设计基准线有助于选择用于弹簧、枢轴、刀口、隔膜和铰链的材料。这些基准线的用处将在本书第 5 章和第 6 章中进行阐述。）

我们先来看一下图表中的这些信息。工程用聚合物有较大的屈服应变，一般为 0.01~0.1；金属的屈服应变只有聚合物的 1/10 左右；复合材料和木制品的屈服应变位于值为 0.01 的等高线上，与最优的金属材料相同；弹性体，由于其极低的弹性模量，其 σ_f/E 的值比其他类的材料都要大，一般为 1~10。

原子间力的作用距离很小，一旦原子间距扩大 10%，其化学键就会破裂。因此，破坏化学键的力 F^* 大约为：

$$F^* \approx \frac{Sr_o}{10} \tag{4.3}$$

式中，S 是指键强。由此，固体的失效应变大约为：

$$\frac{\sigma_f}{E} \approx \frac{F^*}{r_o^2} \Big/ \left(\frac{S}{r_o}\right) = \frac{1}{10} \tag{4.4}$$

观察图表可发现，一些聚合物的失效应变接近这个值，但大多数固体的失效应变要小于这个值。原因有两个：

第一，当结构承受剪切作用时，非局部键并没有破坏。这些非局部键的内聚能不仅源于其最近的原子间作用，又源于大量的其他原子间作用。在受到特定方向的剪切

力作用时，金属键及离子键就会呈现这种状态。对于纯度很高的金属，其屈服强度低至 $E/100000$，因此需要进行强化来使其适用于工程。由于共价键是局部的，共价化合物在低温下屈服强度高达 $E/10$。但是，屈服强度很难精确测量（有时可以通过压痕法来测量），这是因为弱化的存在，即原因二。样品通常含有很多缺陷，易出现应力集中，导致裂纹在应力远低于 $E/10$ 时就发生了扩展。弹性体的强度值没有任何规律性（其强度大致为 E），因为其弹性模量与键的伸长量无关，而是与材料变形时缠绕的分子链的熵的变化有关。

至此，如何选择好的弹簧材料仍未加以说明，包括如何应用图表中的设计基准线。相关内容将在第 6 章 6.7 节中进行阐述。

4.3.4 比刚度—比强度图

许多设计，尤其针对运动类产品的设计，要求在最小重量的条件下保证产品的刚度和强度。为此，我们可以将各种材料的刚度和强度值除以该材料的密度，再重新绘制成图 4.6 所示的 E/ρ 与 σ_f/ρ 的关系图。这些是机械效率的衡量标准，即利用尽可能轻质的材料，实现尽可能好的结构。

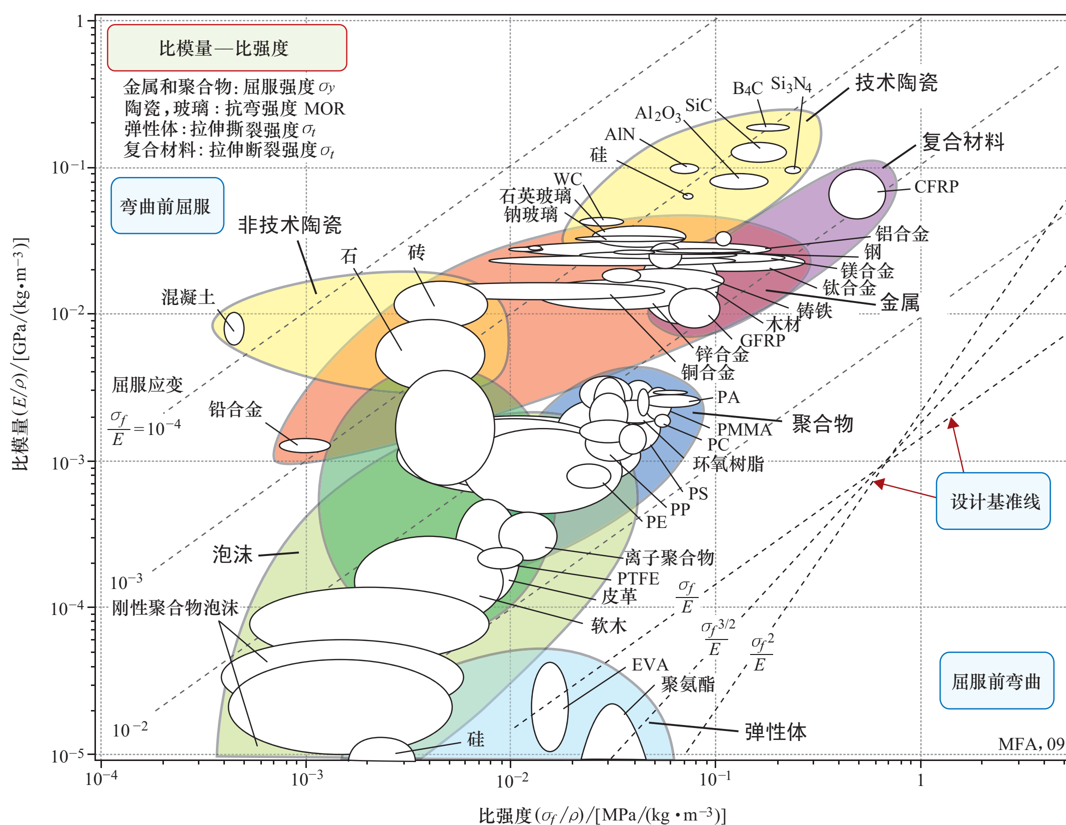


图 4.6 比模量 E/ρ 与比强度 σ_f/ρ 的关系图（设计基准线有助于轻质弹簧和储能设备的材料选择。）

复合材料，尤其是碳纤维复合材料（CFRP），处于图 4.6 的右上角。这类材料拥有极具吸引力的比特性，因此被大量使用于航空业。陶瓷具有特别好的比刚度，且其强度和金属一样好，但是其脆性决定了该类材料不适合做结构件；金属应用受限的重要原因就是其密度相对较高；聚合物的密度相对较低，在此图表中呈现出来的性能要

优于上一张图表。

图 4.6 可用于轻质弹簧和储能设备的材料选择，这将在第 6 章 6.7 节进行详细阐述。

轻质高强度材料

高质量的山地自行车是由比强度值极高的材料做成，这样使其强度大且质量轻。哪种金属的比强度值最高呢？

答：图 4.6 显示钛合金的比强度值最高。

4.3.5 断裂韧度—弹性模量图

只有在材料保持塑性且不变脆的情况下，增加材料的强度才有意义。如果不满足此条件，极易因为内部微小的裂纹或缺陷导致突然断裂而失效。裂纹扩展的抗力可用断裂韧度 K_{IC}表示，单位为 $MPa \cdot m^{1/2}$。它与弹性模量 E 的关系如图 4.7 所示，其值的范围从不到 0.01 到超过 $100MPa \cdot m^{1/2}$。低于此范围的为脆性材料，这类材料在加载过程中始终保持弹性变形直至断裂。对于这类材料，可应用线弹性断裂力学进行分析，其断裂韧度具有明确的定义。

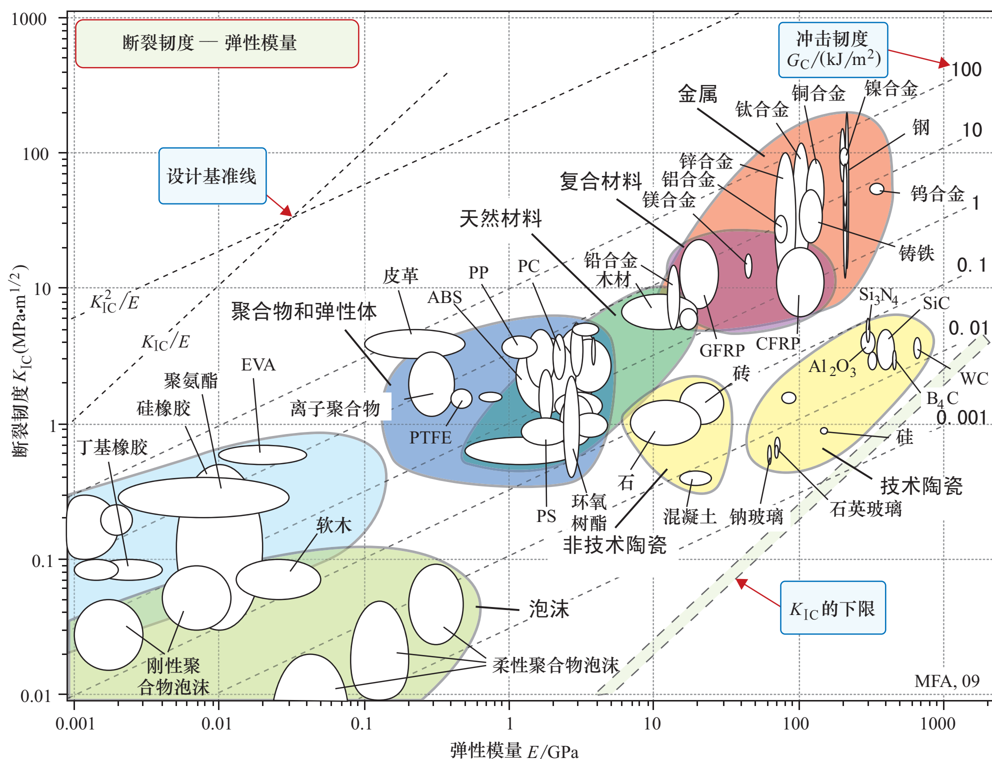


图 4.7 断裂韧度 K_{IC}与弹性模量的关系图（对应 K_{IC}^2/E（可近似为断裂能或冲击韧度 G_{IC}）和 K_{IC}/E 的基准线，有助于在设计中避免断裂。阴影带为 K_{IC}的下限。）

图 4.7 中最上端是超韧性材料，破裂前表现出很强的塑性变形能力。对于这些材料，K_{IC}值很接近，通常由临界 J 积分（J_c）和临界裂纹张开位移（δ_c）计算得到。举

例来说，其表达式可为 $K_{IC}=(EJ_c)^{1/2}$。根据 K_{IC} 值，我们就可以提供一个材料排序。由图 4.7 可知，金属的 K_{IC} 值均高于 $18\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$，这正是金属在工程中占主导地位的原因。对于常规设计，$18\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 通常是最小取值。

一般来说，聚合物的断裂韧度大致与陶瓷和玻璃的断裂韧度相同。然而，聚合物可以广泛应用于工程结构，而陶瓷则由于其易碎性，需谨慎采用。图 4.7 有助于解释这个明显的矛盾。首先考虑断裂的必要条件，即需要足够的外部功或弹性能释放，以提供产生两个面所需的表面能 γ。通常，表面能可表示为：

$$G \geqslant 2\gamma \tag{4.5}$$

式中，G 是能量释放率。基于 G 和应力强度 K 的标准关系 $K=(EG)^{1/2}$，可以得到：

$$K \geqslant (2E\gamma)^{1/2} \tag{4.6}$$

此时，与其弹性模量同数量级的固体材料表面能 γ，可以近似为 $\gamma \approx Er_o/20$，其中 r_o 是原子尺寸，可得：

$$K \geqslant E\left(\frac{r_o}{20}\right)^{1/2} \tag{4.7}$$

取 $r_o=2\times10^{-10}$，可将式（4.7）右边的值作为 K_{IC} 的最小值，即：

$$\frac{(K_{IC})_{\min}}{E}=\left(\frac{r_o}{20}\right)^{1/2} \approx 3\times10^{-6}\text{m}^{1/2} \tag{4.8}$$

材料韧性的比较

聚丙稀（PP）的断裂韧度 K_{IC} 约为 $4\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$，铝合金的断裂韧度比其大约 10 倍。对于挠度设计，冲击韧度 G_c 是更为重要的性能。利用图 4.7，比较两种材料的韧性。

答：铝合金和聚丙烯的冲击韧度 G_c 大致相同，约为 10kJ/m^2。

图 4.7 右下角的对角阴影带定义了 K_{IC} 的下限值。断裂韧度不可能小于这个值，除非有其他的一些能量源存在，比如化学反应或储存在由疲劳加载导致的特殊位错结构中的弹性能释放。这里用一个新的符号 $(K_1)_{scc}$ 来描述应力腐蚀裂纹条件下 K_1 的临界值，用 $(\Delta K_1)_{threshold}$ 来描述疲劳裂纹扩展条件下 K_1 的最小范围。绝大多数脆性陶瓷的断裂韧度接近于这个阈值，发生断裂时，吸收的能量仅仅略大于表面能。当金属、聚合物和复合材料断裂时，由于裂纹扩展时伴随着塑性变形，因此吸收的能量要大得多。

图 4.7 中标注了冲击韧度 G_c 的等高线，即名义断裂表面能（$G_c \approx K_{IC}^2/E$）。固体的真实表面能处在 10^{-4} 到 10^{-3}kJ/m^3 之间。从图中可以看出，冲击韧度值从 10^{-4}kJ/m^2 跨越五个数量级到超过 100kJ/m^2。就这一点而言，陶瓷的冲击韧度（$10^{-3}\sim10^{-1}\text{kJ/m}^2$）比聚合物（$10^{-1}\sim10\text{kJ/m}^2$）要低得多，这也是聚合物比陶瓷更广泛地运用于工程中的原因之一。具体内容将在第 6 章 6.10 节中进行阐释。

4.3.6　断裂韧度—强度图

裂纹尖端的应力集中会产生一个断裂过程区。在韧性材料中为塑性区，在陶瓷中为微裂纹区，在复合材料中为分层、剥离和纤维拔出区。在断裂过程区中，外部功需

克服塑性力和摩擦力。这是冲击韧度 G_c 和表面能 2γ 不同的原因所在。能量耗散由断裂过程区的材料强度及其直径 d_γ 来衡量。令 $r=d_\gamma/2$ 处裂纹尖端应力场（$\sigma=K/\sqrt{2\pi r}$）与材料的强度 σ_f 相等，可得到该直径：

$$d_\gamma=\frac{K_{\mathrm{IC}}^2}{\pi\sigma_f^2} \tag{4.9}$$

图 4.8 给出了断裂韧度与强度的关系。从图中可以看出，断裂过程区的直径 d_γ（虚线）的取值范围，从原子级尺寸（极脆的陶瓷和玻璃）一直到 1m 长度（韧性最好的金属）。如果断裂过程区尺寸恒定不变，断裂韧度将随强度的增加而增大，这就是图 4.8 中的数据集中在对角线附近的原因。

图 4.8 右下角的材料有较高的强度和较低的冲击韧度，在未发生屈服前就已经断裂。而在图 4.8 左上角的材料则正好相反，先发生屈服，后出现断裂。

图 4.8 可用于承载结构件安全设计时的材料选择。本书第 6 章 6.10 节和 6.11 节中将给出具体的例子。

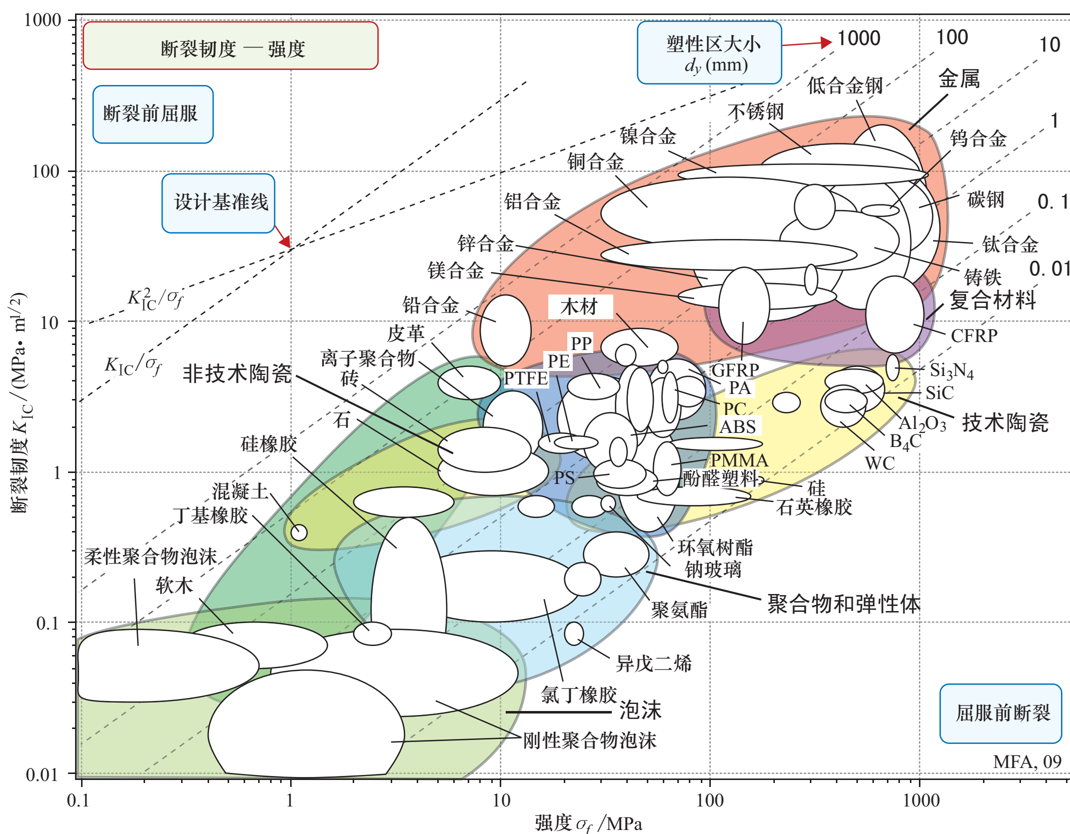


图 4.8 断裂韧度 K_{IC} 与强度 σ_f 关系图（图中的等高线对应 $K_{\mathrm{IC}}^2/\pi\sigma_f^2$ 值，该值约为裂纹尖端断裂过程区的直径 d_γ。设计基准线可以用于抗损伤设计的材料选择。）

合理的韧性测试

在断裂韧度测试中，试样的尺寸至少是裂纹尖端形成的断裂过程区直径的 10 倍，利用图 4. 8 评估用于 ABS 断裂韧度测试的试样尺寸。

答：ABS 断裂过程区尺寸大致为 1mm，合理的试样尺寸必须超过 10mm。

4. 3. 7 损耗系数—弹性模量图

传统意义上，钟一般由青铜制造，但钟也可以用玻璃来制造，用碳化硅制造也不是不可能。在正常条件下，金属、玻璃和陶瓷都有较低的固有阻尼，或称之为“内摩擦”。这是结构振动时材料的一种重要性能。固有阻尼可采用图 4.9 所示的损耗系数 η 来表示。

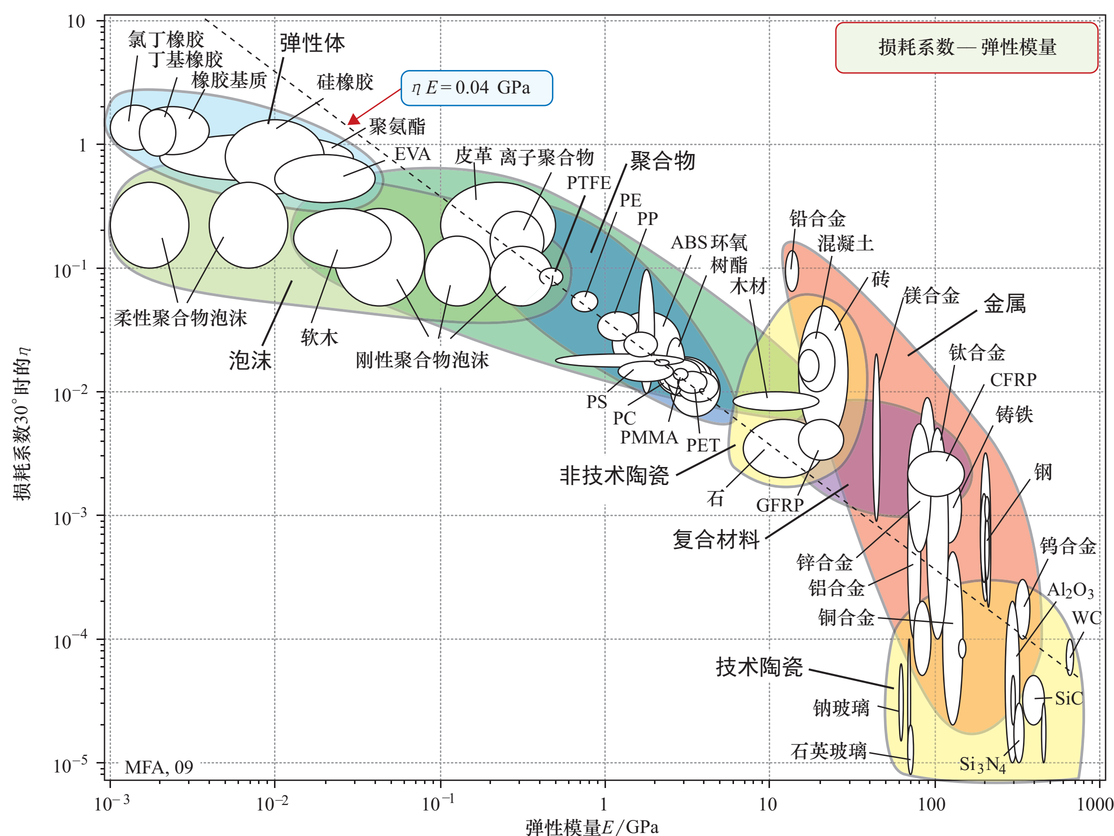


图 4.9 损耗系数 η 与弹性模量 E 的关系图（基准线对应表达式 $\eta = CE$。）

有很多关于固有阻尼和滞后作用的机制。有一些阻尼机制与特定时间常数相关，能量的损失集中在一个特征频率。其他的滞后机制与时间无关，在所有的频率下都可以吸收能量。在金属中，大部分能量损失都是滞后的，由位错运动引起。这种现象在软金属（如铅、纯铝）中最为明显。像青铜和高碳钢这样的合金，其能量损耗较低是因为溶质限制了位错的移动，因此可用作钟的材料。此外，由于存在应变诱导马氏体相变，锰-铜合金的能量损耗系数较大；对于镁合金而言，可逆孪生导致其能量损耗系数也较大。通过合金化和加工硬化，图 4.9 中表示金属的气泡会变长，使得其阻尼性

能横跨的范围增大。工程用陶瓷有较低的阻尼，因为在室温下巨大的晶格抗力限制了位错的移动。

另一方面，疏松的陶瓷内布满了裂纹，加载时裂纹面之间发生摩擦，从而消耗能量。片状石墨铸铁的高阻尼与此原理相同。对于聚合物而言，加载时链状部分发生相对滑动，使得能量耗散，其相对滑动的难易程度取决于环境温度相对于聚合物玻璃化温度 T_g 的比值。当 $T/T_g<1$，次级键被“冻结”，导致弹性模量较高且阻尼相对较低；当 $T/T_g>1$，次级键熔化，链条之间可以发生滑动，此时弹性模量较低，阻尼较高。由此，可以解释图 4.9 中聚合物 η 与 E 的负相关性。事实上，对于聚合物、木制品和聚合物基复合材料而言，两者的关系大致为：

$$\eta=\frac{4\times10^{-2}}{E} \tag{4.10}$$

式中，E 的单位为 GPa。

振动阻尼

寻找一种配件金属材料，装配到一个小型机械工具上实现减震。利用图 4.9 来寻找损耗系数最大的金属，作为配件材料。

答：铅或铅合金是最好的选择。

振动加热

转速 $f=5000\text{r/min}$ 的离心机与聚四氟乙烯（铁氟龙）配件连接。弱平衡性导致离心机振动。在一个应力循环中，聚四氟乙烯达到峰值应力 $\sigma_{max}=8\text{MPa}$。如果离心机连续工作 10min，且聚四氟乙烯上没有热量散失，其温度将升高多少度？由图 4.11 可知，PTFE 体积热容 $\rho C_p=2\times10^6\text{J/m}^3\cdot\text{K}$，其他材料性能可从图 4.9 中查询。

答：图 4.9 显示 PTFE 的弹性模量 $E=0.4\text{GPa}$，损耗系数 $\eta=0.08$，旋转一圈储存在 PTFE 中的最大弹性能为：

$$U_{max}=\frac{\sigma_{max}^2}{2E}=10^4\text{J/m}^3$$

其中每圈损失的能量 $\Delta U=2\pi\eta U_{max}$（式（3. 10）），因此离心机工作 10min，施加在 PTFE 上的能量为：

$$U_{10mins}=2\pi\eta U_{max}(5f)=2.52\times10^8\text{J/m}^3$$

将该值除以 PTFE 的体积热容，可得到温度上升 126℃。因此，确保配件可有效散热以防止过热是非常有必要的。

4.3.8 导热系数—电阻率图

导热系数 λ（单位：W/(m·K)）决定了稳态下材料内热量的流动特性（见图 4.10）。金属中的价电子是自由的，像空气一样在金属的晶格内移动。每个电子携带动能 $\frac{3}{2}kT$，其中 k 为玻耳兹曼常数。能量以碰撞的方式进行传递，使得金属能够导热。

导热系数可以表示为：

$$\lambda = \frac{1}{3} C_e \bar{c} \ell \qquad (4.11)$$

式中，C_e 是单位体积的电子比热容；$\bar{c}$ 是电子速度（2×10^5 m/s）；ℓ是电子平均自由程，在纯金属中一般为 10^{-7} m。在合金固溶体（不锈钢、镍基高温合金和钛合金）中，外来原子使得电子变得稀疏，使平均自由程降至原子尺寸大小（$\approx10^{-10}$ m），大大降低了 λ。

当有电势梯度时，同样的电子会在晶格间漂移，由此产生了导电作用。电导率 κ，可以用其倒数电阻率 ρ_e（SI 单位：Ω·m，常用单位：μΩ·m）来描述。电导率的值范围很大，跨越 28 个数量级，比其他任何性能的值都要大。与热量一样，金属的电导率与其密度、自由电子数及其平均自由程成比例关系，满足维德曼–夫兰兹关系：

$$\lambda \propto \kappa = \frac{1}{\rho_e} \qquad (4.12)$$

图 4.10 中分别以 λ 和 ρ_e 作为横纵坐标轴，金属的数据在左上角。由图中虚线可知，金属基本上遵从了维德曼–夫兰兹关系。

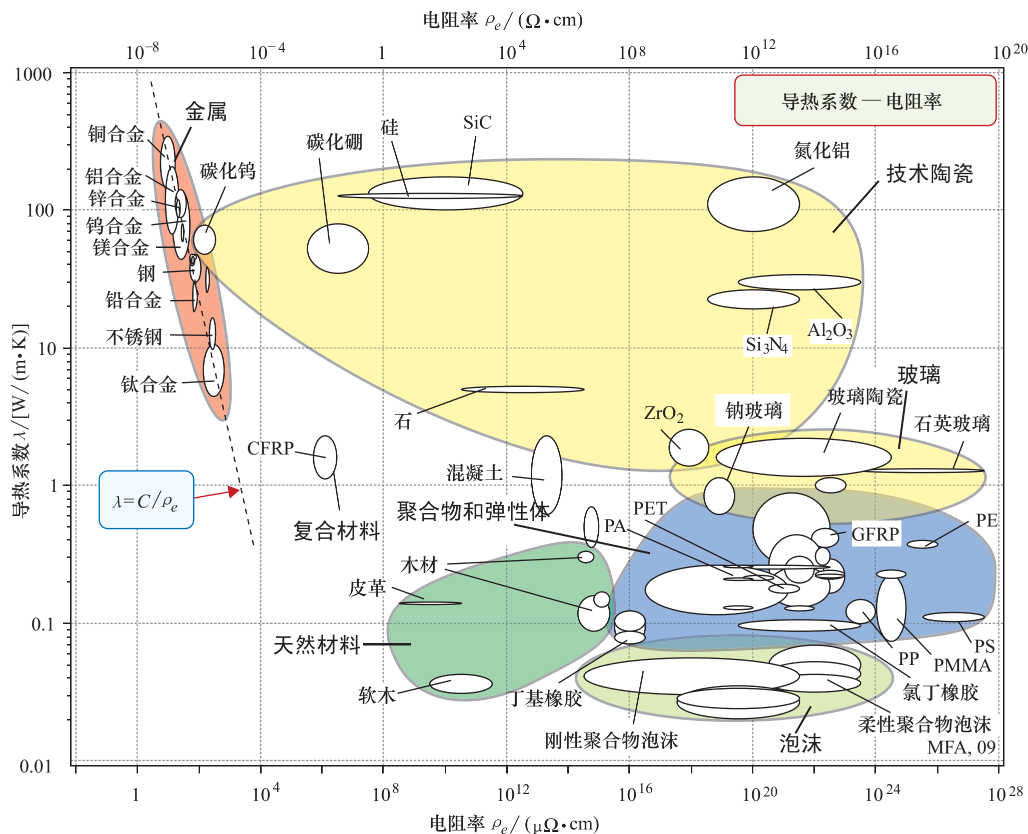


图 4.10 导热系数 λ 与电阻率 ρ_e 的关系图（对于金属来说，二者是相关的。）

那么，图表的剩余部分呢？电子在陶瓷和聚合物中几乎不发挥热传导作用。在这些材料中，热量靠声子——短波的晶格振动传播，而不是电子传播。声子之间的相互作用以及杂质、晶格缺陷和表面的影响，使得声子的排布分散。这些因素决定了声子自由程 l。导热系数仍由式（4.11）给出，可表示为：

$$\lambda=\frac{1}{3}\rho C_p \bar{c}\ell \qquad (4.13)$$

式中，$\bar{c}$ 是弹性波速（由图 4.3 可知，约为 10^3 m/s）；ρ 是密度；C_p 是单位质量的热容（单位：J/(kg·K)）。如果晶体完美无缺且温度低于德邦温度，类似金刚石在室温下，声子的导热系数很高。正因为如此，单晶碳化硅和氮化铝的导热系数几乎和铜一样高。

玻璃的导热系数低，是由其不规则的非晶体结构所引起的。分子链的特征长度（大约为 10^{-9} m）决定了平均自由程。聚合物的导热系数较低是因为其弹性波速较低（见图 4.3），而且在无序的结构中平均自由程较小。一些疏松材料，像耐火砖、软木塞和泡沫，具有非常低的导热系数，主要是受限于孔洞内部气体的导热系数。

石墨和许多金属间化合物（如 C 和 B_4C），与金属一样具有自由电子。但是，自由电子载体的数量较小，且电阻率比金属要高，所以导热系数很低。离子固体存在类似空位和杂质原子这样的缺陷，由此产生了需要平衡电子的阳离子。电子在离子间跳跃，传递电荷。由于载体的密度很低，速度较慢。共价化合物固体和绝大多数聚合物没有自由电子，为绝缘体（$\rho_e>10^{12}$ μΩ·cm）。这类材料位于图 4.10 的右侧。

导热绝缘体

哪种材料既是好的导热体，又是好的绝缘体（一个不同寻常的结合）？从图 4.10 中找出这些材料。

答：从图 4.10 可以看出，氮化铝、氧化铝和氮化硅具有这样的性质，这些材料都在图表的右上角。

在足够高的电势梯度下，任何物体都可以导电。足够高的电势能从最具有吸引力的原子中剥离出自由电子，将其加速并与附近的原子碰撞，产生更多的电子，依次递推，产生连锁效应，就起到了导电作用。临界电势称为击穿电压 V_b（单位为 MV/m），这在第 3 章中已给出了明确定义。

4.3.9 导热系数—热扩散系数图

正如前面所描述的，在稳态传热条件下导热系数决定了热量在材料中的传递，而决定瞬态热流的特性是热扩散系数 a（单位：m^2/s），二者之间的关系为：

$$a=\frac{\lambda}{\rho C_p} \qquad (4.14)$$

式中，ρ 是密度（kg/m^3）；ρC_p 是体积热容（$J/(m^3·K)$）。图 4.11 给出了导热系数、热扩散系数和体积热容三者在室温下的关系。

热缓冲器

为避免设备受到温度突变引起的损害，可以将其置于一种热扩散系数非常低的材料之中，这样外部温度变化很难到达内部。利用图 4.11 确定有此特性的材料。

答：通过图 4.11 可知，异戊二烯、氯丁橡胶和丁基橡胶可作为候选材料。

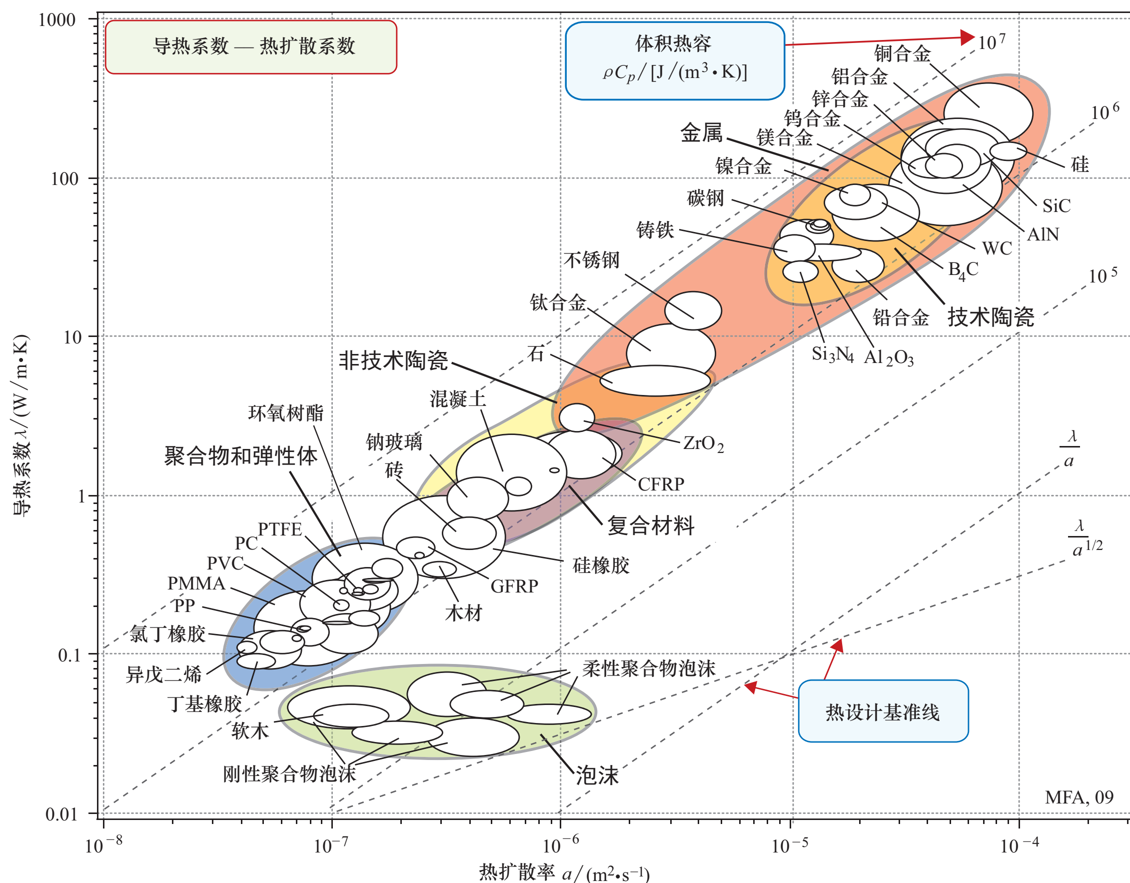


图 4.11 导热系数 λ 与热扩散系数 a 的关系图（等高线对应体积热容 ρC_p。上述三个性能均与温度有关，图中的数据是在室温条件下得到的。）

λ 和 a 大致跨越 5 个数量级。固体材料大致呈直线分布，表达式如下：

$$\rho C_p \approx 3\times10^6 \mathrm{J/(m^3 \cdot K)} \tag{4.15}$$

由此，根据式（4.11）可得：

$$\lambda = 3\times10^6 a \tag{4.16}$$

（λ 的单位为 W/(m·K)，而 a 的单位为 m^2/s）。一些材料不满足此关系，因为其体积热容低于平均值。一些多孔固体，比如泡沫、低密度耐火砖、木制品及类似材料，与上述关系的偏离最大。这些材料的密度较低，意味着其单位体积内包含的原子较少，经过体积平均后，ρC_p 很小。泡沫的导热系数尽管很低，且被广泛地用作隔热材料，但其热扩散系数不一定低。它们传递的热量较少，但是能很快达到稳态。这点在设计中是相当重要的，在本书第 6 章 6.13 节的案例中我们将进行详细阐述。

4.3.10 热膨胀系数—导热系数图

几乎所有的固体在加热时都会膨胀（见图 4.12）。当原子之间的相对位移较小时，两原子之间的键可以类比为线弹性形变的弹簧，但当距离较大时，就表现为非线性了。当原子被压紧时，键的刚度变大，当拉开时刚度变小，这样的键是非简谐性的。即使是在室温下，原子的热振动也存在很大的位移。随着温度的上升，键的非简谐效应使原子分离，扩大了平均

间隙。这可以通过线膨胀系数（这里热膨胀系数为线膨胀比系数）来衡量：

$$\alpha=\frac{1}{\ell}\frac{d\ell}{dT} \tag{4.17}$$

式中，ℓ是物体的线性尺寸。

图 4.12 描绘的是热膨胀系数与导热系数的关系。从图中可以看出聚合物的 α 值很大，大致是金属的 10 倍，几乎是陶瓷的 100 倍。这是由于聚合物的范德华分子键是非简谐性的。金刚石、硅和石英玻璃（SiO_2）的共价键具有较弱的非简谐效应（也就是说，即便在大应变下它们依然能保持线弹性），导致热膨胀系数较低。即便以聚合物为基体，复合材料的 α 值也很小，这是因为内部强化纤维，特别是碳的延伸率很小。

图 4.12 中给出了 λ/α 的等高线。在热变形设计中，这是一个很重要的物理量。图中增加了一种材料，即因瓦合金（一种镍基合金）。这种材料在室温或接近室温下的热膨胀系数极低，是正常膨胀以及磁性转变引起的收缩二者交互作用的结果。这张图的应用将在第 6 章 6.16 节中进行阐述。

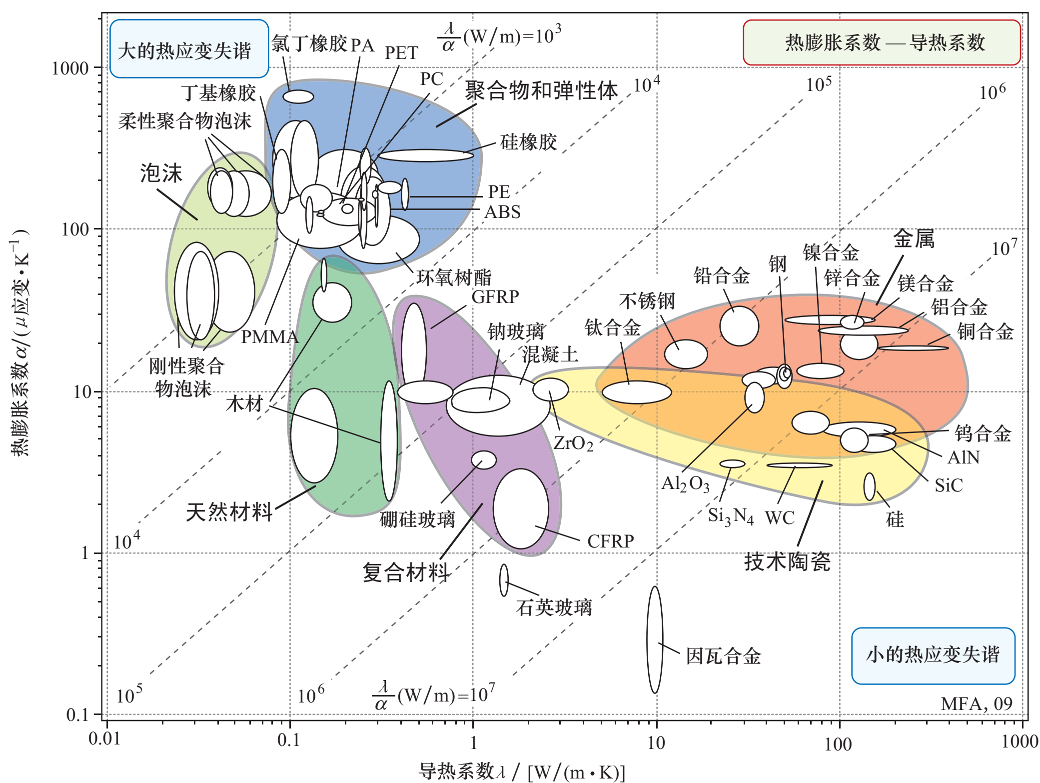


图 4.12 热膨胀系数 α 与导热系数 λ 的关系图（等高线对应热变形参数 λ/α。图中添加了一种镍基因瓦合金。这种材料以其在室温或者接近室温条件下极低的热膨胀系数著称，可用于设计那些不允许热变形的精密设备。）

热作动器

驱动器利用其工作元件的热膨胀来产生驱动力。参考图 4.12，找出热膨胀系数最高的材料。

答：位于图左上角的氯丁橡胶，其膨胀系数的值比图中其他任何材料都要大。

4.3.11 热膨胀系数—弹性模量图

温度改变时，物体由于外在约束以及内部各部分之间的相互约束，使其不能完全自由胀缩而产生的应力，称为热应力。它与材料的热膨胀系数和弹性模量有关。由热膨胀理论可得：

$$\alpha = \frac{\gamma_G \rho C_p}{3E} \tag{4.18}$$

式中，γ_G 是格林爱森参量，其值为 0.4～4，绝大多数固体的 γ_G 接近于 1。另外，ρC_p 几乎是常量（见式(4.15)）。从上式可以看出，α 与 $1/E$ 成正比关系。图 4.13 印证了上述关系。陶瓷的弹性模量最高，热膨胀系数最低；弹性体弹性模量最低，因此热膨胀系数最大。一些配位数较低的材料（二氧化硅和一些具有金刚石立方晶体结构或闪锌矿晶体结构的材料）偏向于以一种横向振动的模式吸收能量，使得 γ_G 值很小甚至为负

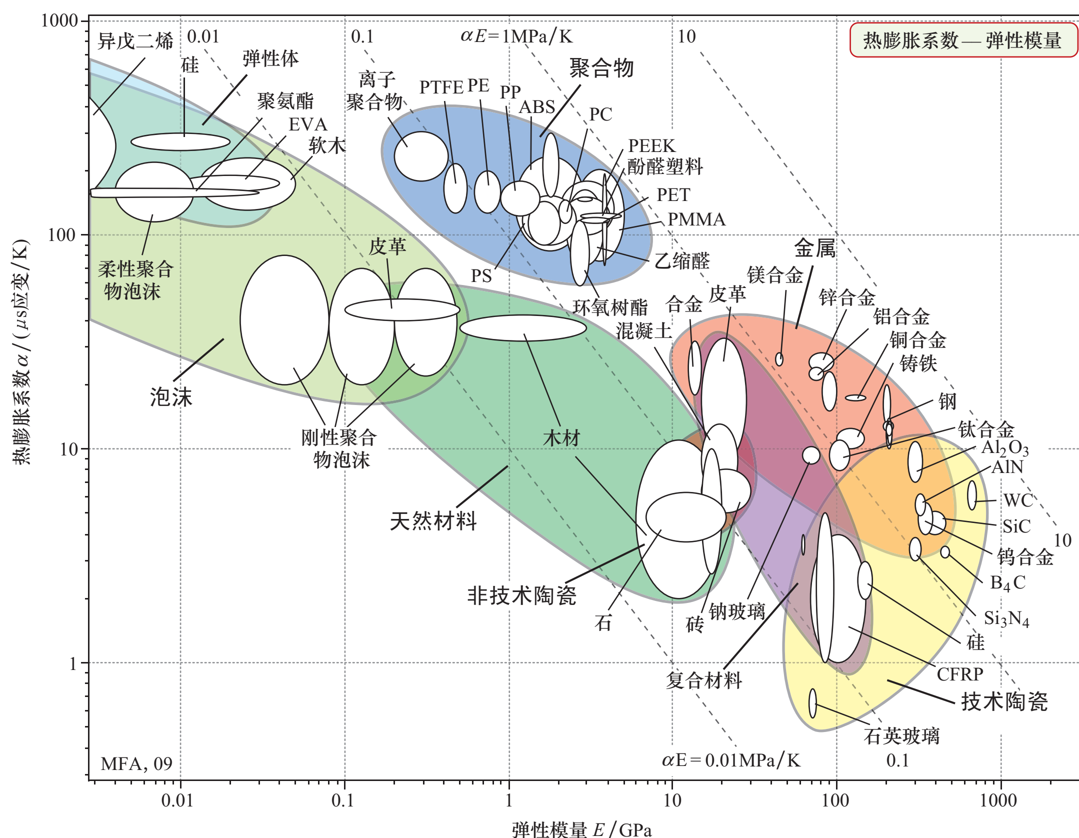


图 4.13 热膨胀系数 α 与弹性模量 E 的关系图（等高线对应试样在轴向约束条件下单位温度变化引起的热应力。对于双向或三向约束，可采用系数 C 进行修正。）

值，并且热膨胀系数很低（如二氧化硅）。其他如因瓦合金，当加热到居里温度时，就会失去铁磁性，进而收缩。在一定的温度范围内，因瓦合金的热膨胀系数接近零值，使其在精密装备和玻璃金属密封中得到很大的应用。

事实上，材料的弹性模量与其熔点 T_m 近似成比例关系：

$$E \approx \frac{100kT_m}{\Omega} \tag{4.19}$$

式中，k 是玻耳兹曼常数；Ω 是结构中原子的体积。将上述弹性模量表达式以及 ρC_p（式（4.15）），代入式(4.18)，可得：

$$\alpha = \frac{\gamma_G}{100T_m} \tag{4.20}$$

由此可见，热膨胀系数与熔点成反比例关系。同样地，所有固体的热应变，在其熔化前，仅仅取决于 γ_G，大致为 1% 的常数。式（4.18）、式（4.19）和式（4.20）给出了各性能之间的相互关系，对于评估和检验材料性能非常有用。(见附录 A.14 节)。

热应力

一根钢棒，两端刚性固定，如果温度升高 100℃，则其热应力大约为多少？利用图 4.13 中找出答案。

答：从图中可以看出，钢的 $\alpha E = 3\text{MPa/K}$。因此，温度改变 100℃ 时，热应力大约为 300MPa。

当物体不能自由热膨胀或是冷收缩时，热应力就会出现。如果热应力足够大，也会导致材料屈服、断裂或者弹性破坏（屈曲）。通常情况下，要区分两种热应力，一种是由外部约束导致的热应力（如一根两端刚性固定的杆）；另一种是内部的温度梯度导致的热应力。这些热应力都采用 αE 值来衡量。图 4.13 中的对角等高线就对应该值。更准确地说，在受外部约束的系统中，单位温度变化引起的热应力，或是在无约束系统中，表面温度的突然变化引起的热应力，都可以用下式来表示：

$$C\Delta\sigma = \alpha E \tag{4.21}$$

式中，$C=1$ 是轴向约束；$C=1-\nu$ 是双向约束或普通淬火；$C=1-2\nu$ 是三向约束，其中 ν 是泊松比。这些热应力较大，通常为 1MPa/K。突然的加热或冷却足以使材料发生屈服，产生裂纹、碎裂或屈曲。

4.3.12 最高工作温度图

温度在很多方面会影响材料的表现。随着温度上升，材料可能发生蠕变，限制了其承载能力；也可能退化或者分解，化学结构发生变化，最终导致失效。温度的升高也可能使产品氧化，或与环境发生其他反应，使其无法发挥正常作用。由于以上任何一个原因，材料不能安全使用的近似温度称为最高工作温度 $T_{\max}$。图 4.14 以柱状图的方式给出了材料的最高工作温度。

图 4.14 以鸟瞰图的方式描绘了各类材料的可工作温度范围。很明显，极少数聚合物能在超过 200℃ 的条件下使用，少数金属的可工作温度范围超过 800℃。此外，只有陶瓷在 1500℃ 以上依然保持足够的强度。

不锈钢的工作温度

某构件在 500℃ 条件下运行，采用不锈钢作为构件的一部分，这样做是否安全？

答：由图 4.14 可知，不锈钢的最大工作温度为 700～1000℃。因此，在 500℃ 的条件下使用是可行的。

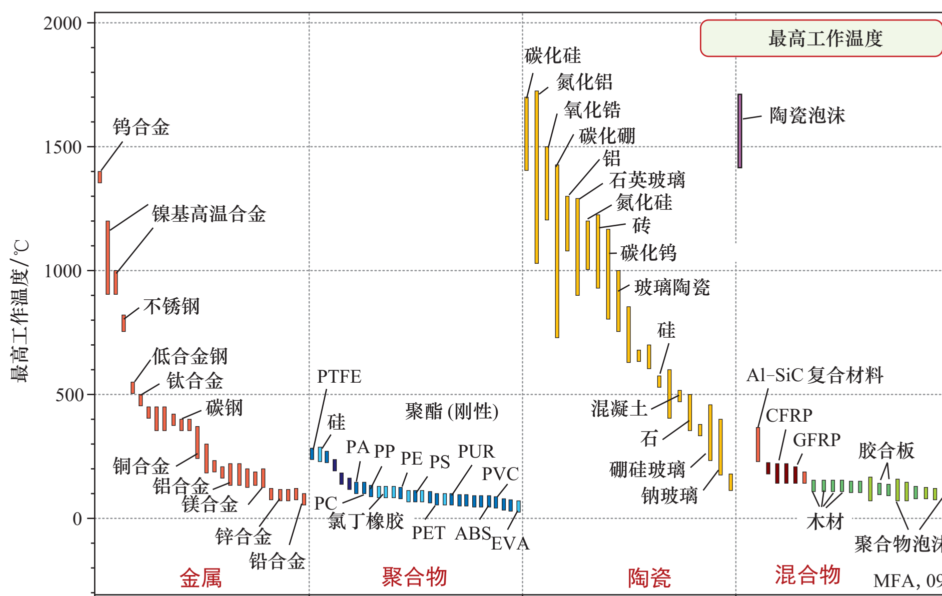


图 4.14 最高工作温度（超过此温度材料失效。）

4.3.13 摩擦和磨损

据说，上帝创造了材料，但魔鬼给了一个表面。表面是很多问题的来源。当表面之间相互接触和滑动，就会产生摩擦，有摩擦就会有磨损。那些研究摩擦和磨损的学者常常说，能量损失和设备磨损造成的巨大经济损失，罪魁祸首就是摩擦和磨损。的确，如果摩擦能够被消除的话，发动机、齿轮箱和传动机构等等设备的效率将会大大提高。如果磨损能够被消除，设备的寿命将大大延长。但是，我们不能只看到摩擦和磨损的负面作用。假如没有磨损，铅笔将不能在纸上书写，粉笔也不能在黑板上书写。如果没有摩擦，即使在最小的斜坡上人们也会滑倒。

摩擦性能并非是某种材料的属性，而是相对滑动的一对材料的属性。很多时候，接触面之间还会有第三种材料。由于组合数量庞大，难以用一种简单、系统的方法来进行配选。对于轴承、传动以及滑动密封零件的材料选择很大程度上来源于经验，而经验主要来源于相关的资料（见附录 D）。这些资料具有很好的参考价值，有助于预估材料的摩擦系数和磨损系数，并且建立不同材料类别之间的关系。

两个表面在法向载荷 F_n 的情况下相接触，当一个表面相对于另一个进行滑动时，会产生一个力 F_s 阻碍其运动。该力与 F_n 成正比，但与接触面积无关——这是摩擦学研究的最为重要的结论。意味着，表面并不是完全接触，而是只有一小部分接触，实际接触面积与名义接触面积 A_n 无关。因此，摩擦系数 μ 可以定义为：

$$\mu = \frac{F_s}{F_n} \tag{4.22}$$

图 4.15 给出了各种干燥、未经润滑的材料在钢表面滑动的近似摩擦系数。一般地，$\mu = 0.5$。一些材料的摩擦系数很高，要么是因为摩擦时黏合在了一起（例如，软金属在没有润滑条件下与它自己发生摩擦），要么是一种材料的弹性模量非常低

以至于粘在另一个表面（例如，橡胶在粗糙的混凝土上滑动）。另一种极端情况，滑动组合间的摩擦系数极低，如聚四氟乙烯或石墨负载的青铜轴承在抛光钢板表面滑动，此时的摩擦系数降至 0.04。与图底部所示润滑表面的摩擦系数相比，该值依然很高。

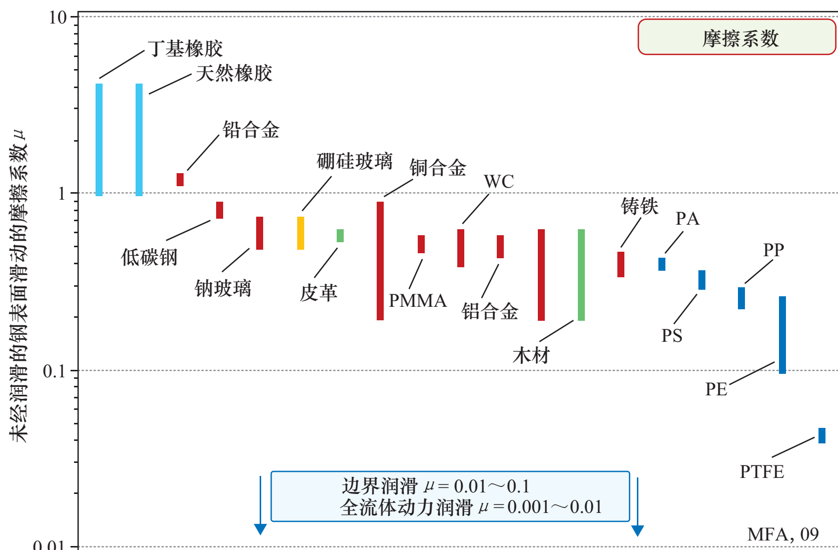


图 4.15 各种材料在未经润滑的钢表面滑动的摩擦系数

当发生相对滑动时，表面就会磨损。即便一种材料比另一种材料要硬得多，两个表面也都会磨损。磨损率 W（单位为 m^2）通常定义为：

$$W=\frac{\text{从接触表面移除的材料体积}}{\text{滑动距离}} \tag{4.23}$$

实际应用中，我们更多地使用比磨损率，即：

$$\Omega=\frac{W}{A_n} \tag{4.24}$$

这是个无量纲的量。比磨损率随着压力 P（正应力 F_n 除以名义面积 A_n）的增大而增大，两者的比例关系为：

$$k_a=\frac{W}{F_n}=\frac{\Omega}{P} \tag{4.25}$$

这个比例大致为常数。磨损率常数 k_a（单位：MPa^{-1}）可用于衡量滑动副的磨损性能。在给定压力下，磨损率常数越大，磨损越快。

承载压力 P 的大小是由设计所决定的，而表面承载静态接触压力的能力是由硬度 H 来衡量的。因此，最大承载压力与较软材料的表面硬度成比例：

$$P_{\max}=CH$$

式中，C 是常数。由此，受压表面的比磨损率可以写成：

$$\Omega=k_aP=C\left(\frac{P}{P_{\max}}\right)k_aH \tag{4.26}$$

上式中出现了两种材料性能：磨损率常数和硬度。两者的关系如图 4.16 所示。图中有一组对角等高线，对应下式的无量纲量：

$$K = k_a H \tag{4.27}$$

需要注意，一类材料（例如金属）在图中往往沿着向下倾斜的对角线分布。可以看出，材料的硬度越高，磨损率常数越低。对于给定压力 P，最适合做轴承的材料是 k_a 值最小的材料，位于图表的底部。另一方面，一个高效的轴承，根据其大小和重量，将会被加载到其最大承载压力的安全阈值，即达到常数值 P/P_{max}。此时，$k_a H$ 值最低的材料才是最佳的选择。

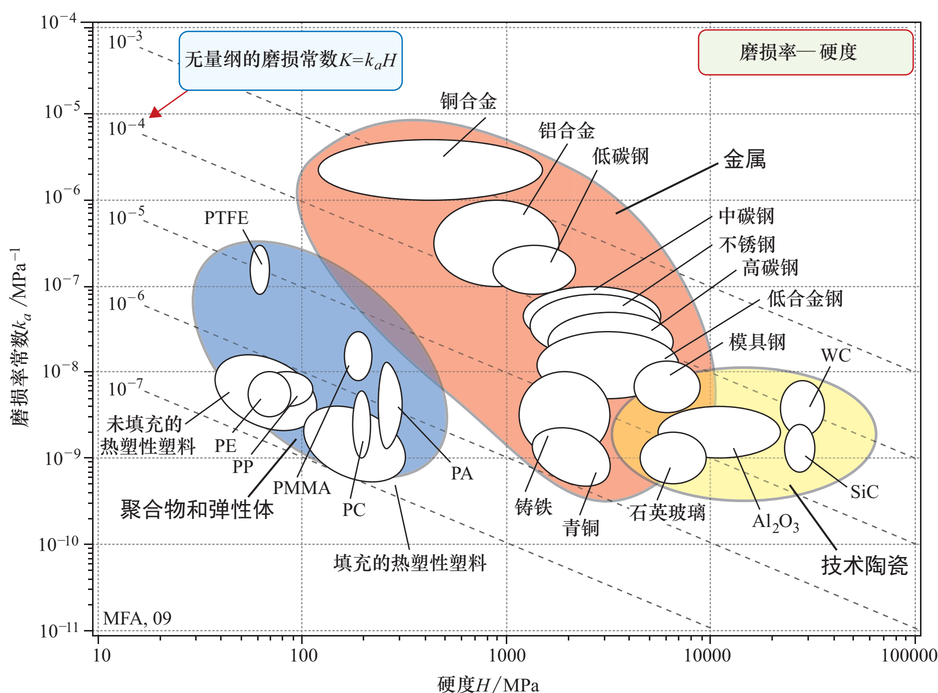


图 4.16 磨损率常数 K_a 与硬度 H 的关系图（图中采用 MPa 而不是维氏硬度表示硬度（1MPa = 10HV）。图中给出了常用工程材料的性能概况。）

轴承材料

利用图 4.16 找到在恒定承载压力下具有良好抗磨损能力的两种金属和两种聚合物。

答：从图中可以看出，青铜和铸铁，聚碳酸酯（PC）和尼龙（PA）是比较好的选择。

4.3.14 成本柱状图

弹性模量、强度和导热系数这样的性能不会随时间而改变，但成本却比较麻烦，因为其会随着时间变化。供给、需求、预测和通货膨胀都会使得商品（如铜和银）单位质量的价格产生相当大的波动。普通材料单位质量的价格数据都会以表格的形式刊登在日报和贸易杂志上，有些材料的价格可能很难找到。图 4.17a 和 b 分别给出了材料单位质量和单位体积的价格近似值。大多数商品材料（玻璃、钢、铝和常见的聚合物）

的价格为 0.5~2.0 $/kg。由于商品聚合物的密度较低，其单位体积的价格比金属低很多。

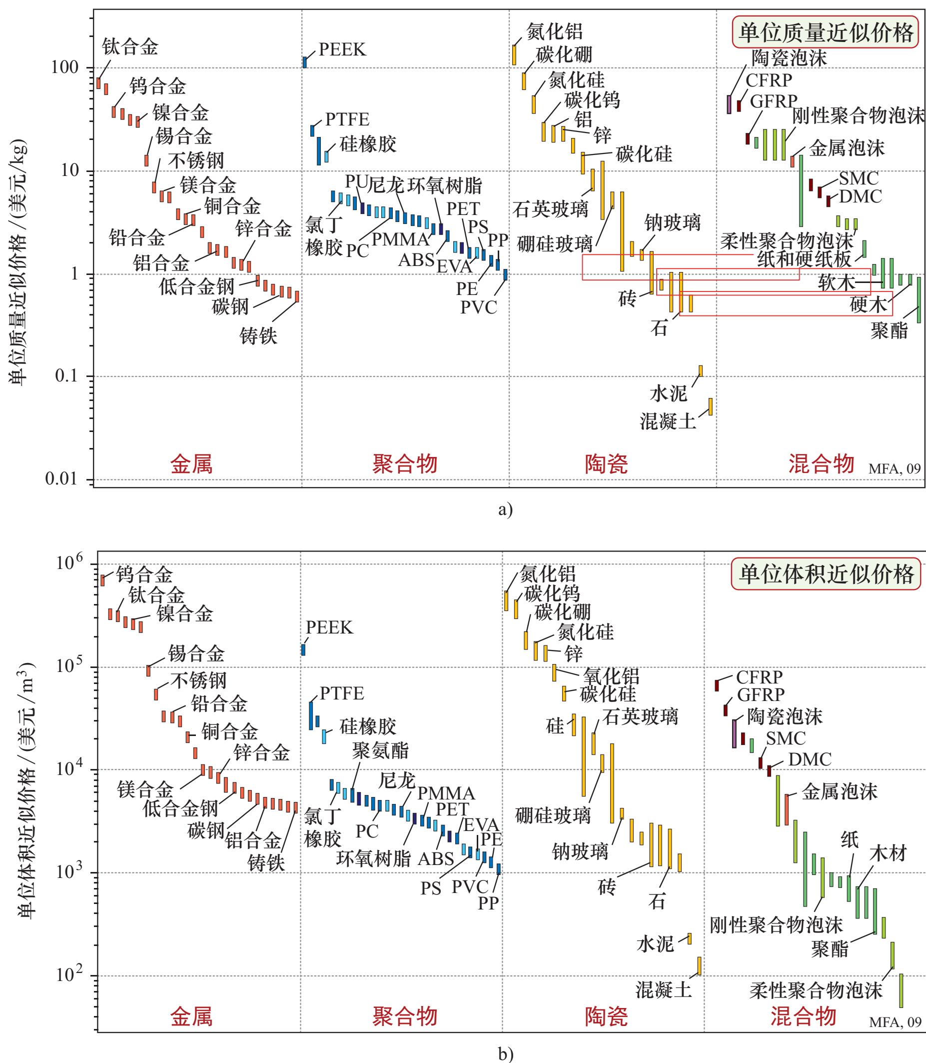


图 4.17 材料单位质量和单位体积的近似价格

a）材料单位质量的近似价格（商品材料价格大约每千克 1 美元，特殊材料价格高一些。）

b）材料单位体积的近似价格（由于聚合物密度低，单位体积的价格比其他绝大多数材料都要便宜。）

聚合物价格

哪四种聚合物价格最便宜？

答：从图 4.17 可以看出，不论是以重量还是体积为单位，四种最便宜的聚合物分别为聚丙烯（PP）、聚乙烯（PE）、聚氯乙烯（PVC）和聚苯乙烯（PS）。这些都是被大量使用的商品聚合物。

比价

单位质量聚丙烯和聚乙烯与单位质量的钢相比，哪个价格更高？如果是单位体积呢？

答：从图 4.17 可以看出，单位质量的两种聚合物比钢贵。由于聚合物密度低，若以单位体积为标准，聚合物更便宜。

如果要进行合理比较，我们应该以什么作为比较的基准？答案是单位使用效益，这在后面几章中会进行阐述。

4.3.15 弹性模量—相对成本图

在成本最小化的设计中，可根据弹性模量、强度和单位体积的成本等指数来选择材料。为了消除通货膨胀和货币兑换对材料成本的影响，定义了单位体积相对成本 $C_{v,R}$：

$$C_{v,R}=\frac{\text{价格/kg}\times\text{材料的密度}}{\text{价格/kg}\times\text{低碳钢条的密度}} \tag{4.28}$$

本书写作时期，钢筋的价格大约为 0.3 \$ /kg。

图 4.18 给出了弹性模量 E 与单位体积相对成本 $C_{v,R\rho}$ 的关系。其中，ρ 为密度。价格便宜且刚性好的材料位于左上角。另外，图中还绘出了有助于选择刚性好且价格便宜材料的基准线。

图 4.18　弹性模量 E 与单位体积相对成本 $C_{v,R\rho}$ 的关系图

（设计基准线有助于使单位成本的材料刚度最大化。）

4.3.16 强度—相对成本图

图 4.19 所示为有助于选出便宜且强度高的材料。该图为前述强度与单位体积相对成本的关系图。之前给出的强度定义，这里依然适用。

必须强调，图 4.18 和图 4.19 所示的数据相对于其他图表可靠性要低一点，而且易出现不可控的变化。尽管存在某些极端情况，这两张图表还是相当实用的。“单位成本的使用效益”标准有助于选择所需的材料。第 6 章 6.5 节将给出相应的例子。

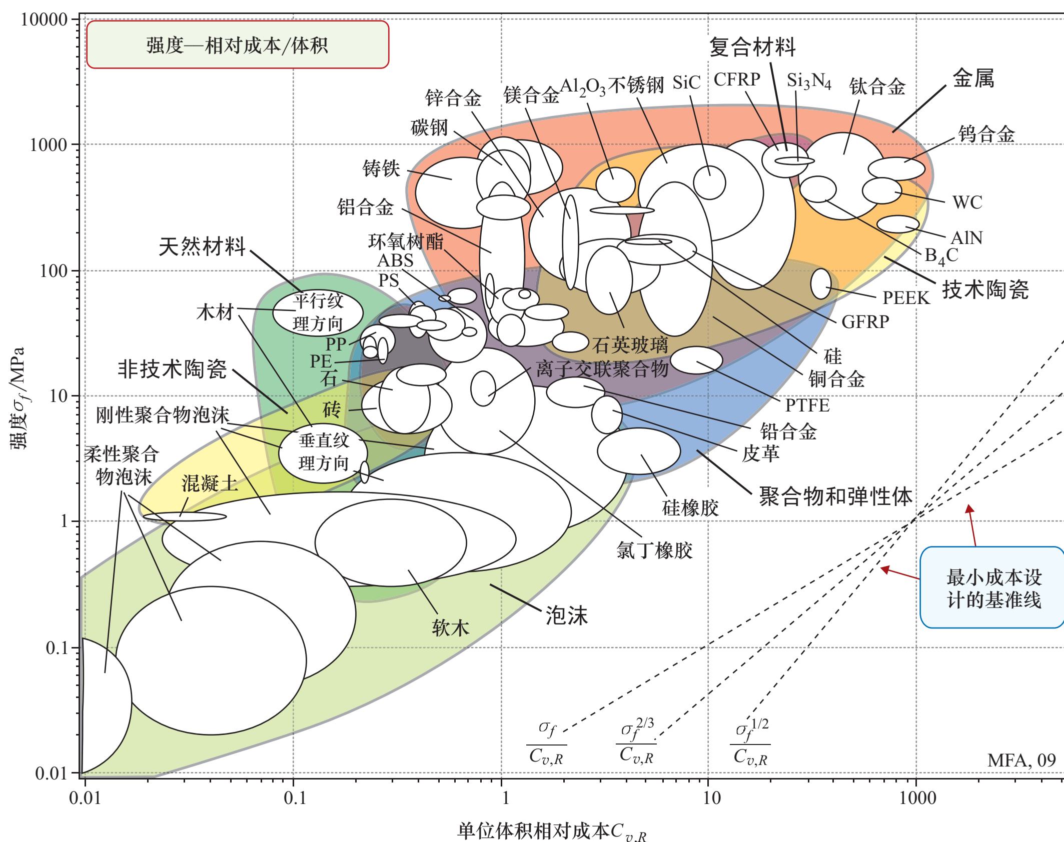


图 4.19 强度 σ_f与单位体积相对成本 $C_{v,R}$的关系图（设计基准线有助于选择单位成本强度最大的材料。）

4.4 本章小结

材料的工程特性以材料选择图表的形式展示出来是非常实用的。本章介绍其中的 18 张图，更多的将在后面的几章阐述。图表将材料的性能用紧凑简单易懂的方式总结出来，展示了各类材料的性能范围。通过合理选择坐标轴，可以将更多的信息呈现在图表上。弹性模量 E 与密度 ρ 关系图可以反映纵波速度 $(E/\rho)^{1/2}$；断裂韧度 K_{IC}与弹性模量 E 关系图体现的是冲击韧度 G_{IC}；导热系数 λ 与热扩散系数 a 关系图可以给出体积热容 ρC_p；强度 σ_f 与弹性模量 E 的关系图可以展示材料的储能能力 σ_f^2/E 以及其他的量。

图中最显著的特征是同一类材料往往聚集在一起。尽管金属的弹性模量及密度的

范围很广，但其聚集的区域明显与聚合物、陶瓷或者复合材料不同。对于强度、冲击韧度、导热系数及其他的性能亦是如此。各个区域时常重叠，但在整个图中每类材料都有自己特定的区域。

不同区域的位置及其关系可以从简单的物理学角度来理解。化学键的本质、排布密度、晶格抗力、结构的振动模式都与化学键和原子排布方式有关。令人奇怪的是，为什么很少提到微观组织对材料性能的影响。从图中可以看出，材料性能之间最大的不同，主要来源于原子的质量、原子间作用力的本质和原子堆积的几何方式。合金熔炼、热处理和机加工（见第 13 章），所有这些都会影响微观组织，进而影响到材料的性能。在很多图表中，这类影响表现为气泡的拉长，但其量级要比化学键和结构的影响小 10 倍左右。

所有的图表都有一个共同点，即图中部分区域有材料，而有些区域没有材料。一些区域不存在相应的材料，根本原因与原子尺寸和原子间结合力的本质有关。从理论上来讲，虽然有些区域是空的，但实际是可以有材料的。这些区域内的材料一旦出现，必然引发新的设计。关于如何获得这些新材料，将在本书第 11 章和第 12 章进行讨论。

本章所给出的图有很多方面的应用。首先，可以检验和验证材料数据（见附录 A）；如本章 4.3 节所描述，图中既包含各种材料性能所占据的区间范围，又包含性能之间的数量关系（类似 $E\Omega = 100kT_m$）。另一个重要应用就是新材料的发展及其使用。在一个或多个图中填补空白的材料通常可以提供改善设计的潜能。最重要的是，这些图是材料选择过程的基础。相关内容将在接下来的几章中进行阐述。

4.5 扩展阅读

关于材料力学性能的物理原理，可参阅 Cottrell 在 1964 年出版的著作。

1）Ashby，M. F.，Shercliff，H. R.，& Cebon，D. （2009）. *Materials：Engineering，science，processing and design*（2nd ed.）. Butterworth-Heinemann，ISBN 978-1-85617-895-2.

一本基础书籍，通过材料属性图表的方式来介绍材料，并基于案例形成相应的材料选择方法。

2）Budinski，K. G.，& Budinski，M. K. （2010）. *Engineering materials，properties and selection*（9th ed.）Prentice Hall，ISBN 978-0-13-712842-6.

一本享有盛誉的材料书籍，涉及材料属性和工艺。

3）Cottrell，A. H.（1964）. *Mechanical properties of matter*. Wiley，Library of Congress Number 65-14262.

一本给人灵感的书籍，清晰、见解深刻，且有很多关于固体、液体的气体力学性能的基本公式推导。

4）Dieter，G. E. （1999）. *Engineering design，a materials and processing approach*（3rd ed.）McGraw-Hill，ISBN 9-780-073-66136-0.

一本受人尊敬的书籍，注重于技术设计中材料与工艺的定位。

5）Farag，M. M. （2008）. *Materials and process selection for engineering design*（2nd ed.）. CRC Press，Taylor and Francis，ISBN 9-781-420-06308-0.

从材料科学角度来实施材料选择。

6）Shackelford，J. F.（2009）. *Introduction to materials science for engineers*（7th ed.）Prentice Hall，ISBN 978-0-13-601260-3.

一本享有盛誉的材料书籍，偏向设计多一些。

7）Tabor，D.（1978）. *Properties of matter*. Penguin Books.

与 Cottrell 那本书一样，这本书以其论点清晰和物理学观点而闻名。

第5章

材料选择的基本原则



图5.0　承受拉伸、弯曲、扭转和压缩的结构件，上面标注了材料指标
（感谢诺曼·福斯特及其合作伙伴提供的伦敦斯坦斯特德机场的照片）

5.1　引言

本章设定了选择材料的基本流程，建立了材料与功能之间的联系（见图5.1）。每种材料都有其属性：密度、强度、成本、抗腐蚀性等。任何一种设计，通常要求

这些性能的某种组合，比如低密度、高强度、中等成本和耐海水腐蚀。初始阶段以所有材料为备选是很重要的，否则会漏掉某种可能性。如果要有所创新，必须在设计初期就要明确。随后，还要做出很多决策和努力以促成根本性变革。机不可失，时不再来。

选择过程有两条主线，分别是：

1）确定所需的性能组合表。

2）将上述性能组合表与真正的工程材料性能作比较，找到最合适的材料。

解决问题的第一步是解读，即检查设计需求，确认材料需满足的约束条件。首先，排除那些不满足约束条件的材料，材料选择范围将大大减小。然后，依据材料性能最大化的能力对第一步中符合要求的材料进行排序，可以进一步缩小范围。本章就是讲述如何做到这两点。

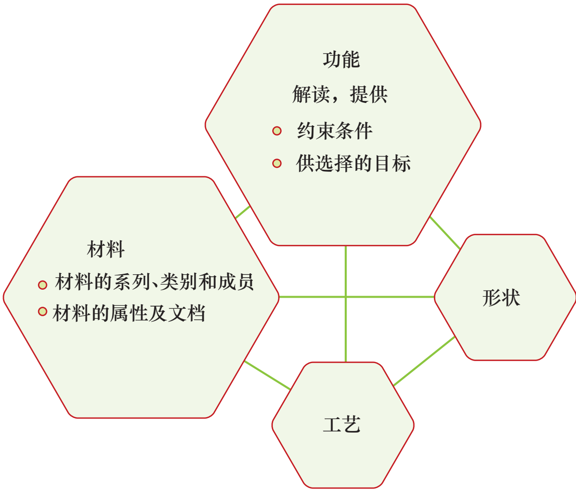


图 5.1 材料选择取决于功能，有时也会受到形状的影响（本章和下一章都只针对不考虑形状影响的材料选择问题。）

第 4 章中提到的材料性能图是为了方便地应用这些标准进行设计。将约束条件和设计目标在图上表示出来，很容易得到最符合设计要求的材料子集。整个过程可以软件化形成设计工具，实现计算机辅助选择。整个流程简洁快速，并且有利于多方位思考问题（如果……将会……）。第 6 章将会给出该方法的应用实例。

5.2 选择方法

5.2.1 材料属性

图 5.2 描述了材料是如何划分为系列、类别、子类和成员的。每个成员都有一系列的属性特征，即它的性能。举例来说，材料包含“金属”系列，“金属”系列又包含“铝合金”类，“铝合金”类包含子集“6000 系”，“6000 系”包含特定的成员“6061 铝合金”。该材料与其他材料一样，有着一系列属性特征，包括力学的、热学的、电学的、光学的和化学的特性以及它的工艺特点、成本、制取难易程度和对环境造成的影响，称之为性能组合表。材料选择就是要找到与设计要求的性能组合表匹配最佳的材料。

5.2.2 选择策略

本章内容主要讲述选择的策略。产品选择相比于材料选择，二者的思想是一样的，但材料选择要复杂得多。

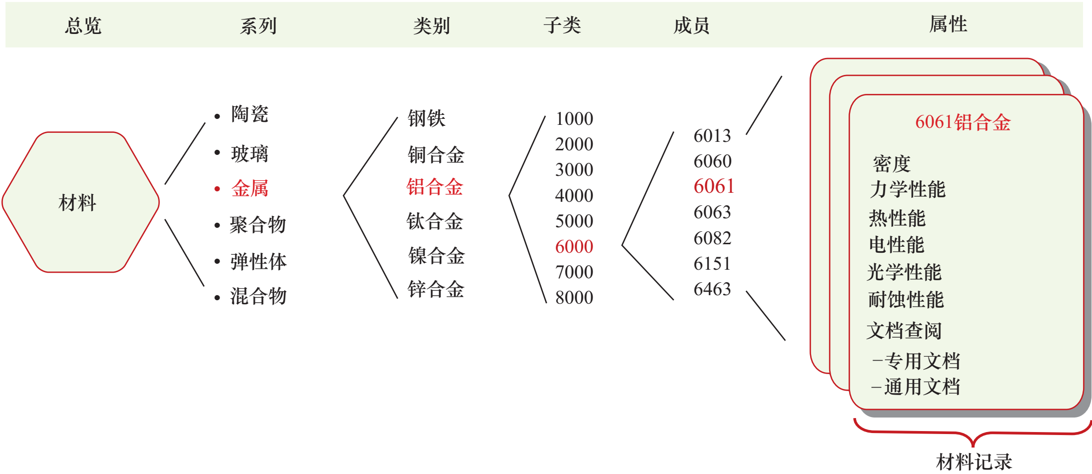


图 5.2 材料及其属性的分类方法（计算机辅助选择软件可以将数据以这样一种分层结构进行存储。）

例如，你需要一辆新车。要求是中型四门轿车，内燃发动机至少为 150 马力（1 马力 = 735.499 W），这样可以拖动汽艇。除了上述基本要求，你希望价格和保养费用尽量低（见图 5.3 左侧）。

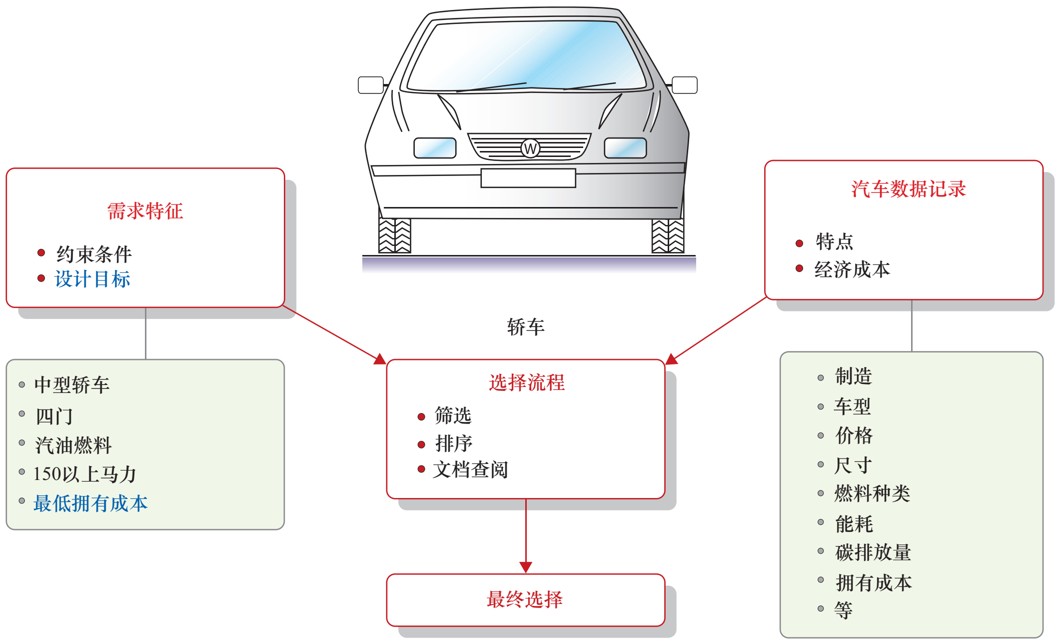


图 5.3 选车——选择策略的例子（所需功能是约束条件，用来排除不合适的车。筛选出来的车按照拥有成本进行排序。）

针对这个例子，我们列出了三个类型不同的约束条件。

➢ 四门轿车和内燃发动机的要求属于简单约束，具备这些基本条件的车才能作为候选车辆。

➢ 至少 150 马力的要求只给出了动力要求的下限，它是一个限制性约束，任何车辆只要具备 150 马力或更高马力都是可接受的。

拥有成本最小化是要实现的目标，即卓越标准。在满足所有约束条件的车中，最理想的车是使得成本最小化的车。

接着，你需要关于可选轿车的更多信息（见图 5.3 右侧）。汽车杂志、汽车生产商的网站、经销商的清单列举了相关信息，包括车型和尺寸、车门数量、燃料种类、发动机动力和价格，汽车杂志还估算了拥有成本（即运行成本、税、保险、服务和贬值等的总和），单位是 $/mile 或€/km。

现在，做决定的时刻到了（见图 5.3 中部）。在这个例子中，你是选择引擎。首先，利用约束条件排除不合要求的车，选出那些至少 150 马力、内燃发动机和四门的轿车。但是，很多车都符合要求，使得候选清单依然很长。此时，我们需要一种排列方式，使得最佳选项在顶部。这就是目标的用处所在，它可以帮助我们根据成本对候选车辆进行排序，使得成本最低的车辆排在顶部。排序的目的并非为了选择最便宜的那辆车，最好是保留排名前三或者前四的车。然后，进一步搜索资料，即更深一步考虑这些车辆的其他特点，包括交货时间、油箱大小、座椅舒适度和保修时间等等，权衡比较所期望的特点对拥有成本造成的细微差别，做出最后的选择。

这类决策方法在很多方面都有应用，如新产品设计方案的选择，新工厂运营方式的最优化，新城镇地址的选择……还有材料选择，这是我们接下来要着重讲述的内容。

材料选择就是寻找设计要求与备选材料性能之间的最佳匹配。图 5.4 给出了针对安全头盔保护面罩进行材料选择的策略。左侧是材料必须满足的要求，即约束条件和设计目标。其中，约束条件为易于成形且必须透明。因为面罩是用来保护脸部的，设计目标为尽可能防碎，意味着材料要有尽量高的断裂韧度。



图 5.4 材料选择：先把设计需求转换为约束条件和设计目标

（约束条件用于筛查，设计目标（也称为材料指标）用于排序。）

右侧是从供应商数据表、手册、网络资源和专用材料选择软件中获取的材料属性数

据。把左侧约束条件与右侧材料属性进行对比，排除无法满足要求的材料，列出可行的材料清单。整个过程跟选车的例子是一样的。接着，按照断裂韧度大小为材料清单进行排序，找出三种满足约束条件并且有着最高断裂韧度的材料，再进行详细调查研究。

然而，还有一个复杂因素存在。对于汽车的要求是直接的，即门、燃料类型和动力，制造商们已经将这些信息清楚地列了出来。然而，对于产品部件的设计要求往往规定了产品的用途，却没有指出它的材料应该有什么性能。因此，选材的第一步是解读，即将设计要求（经常是模糊的）转化为约束条件和设计目标，使其能应用于材料数据库（见图 5.5 顶部）。第二步是筛查，就像选车一样，排除那些不能满足约束条件的材料。接着就是排序，将选出来的材料按照卓越标准排序，如成本最小化或者抗冲击性最大化。最后一步是深层次探究最符合要求的候选材料，了解这些材料现今的应用方式、分析失效案例，以及这些材料用于设计的最佳方式。该步骤即称为文档查阅。接下来，我们来详细地看看每个步骤具体是如何实施的。

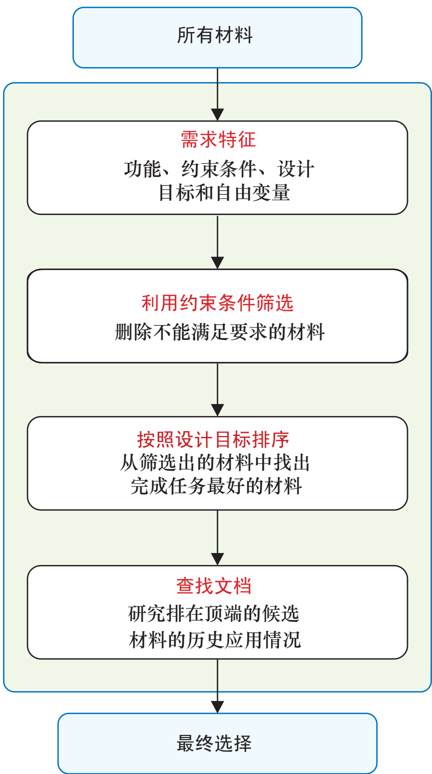


图 5.5　材料选择策略的四个主要步骤：解读，筛查，排序和文档查阅

5.2.3　解读

如何将一个零部件的设计需求（即该零部件需完成什么工作）转换成对材料的要求呢？任何一个工程零部件都有一个或者多个功能，如承载、受压和传热等等。实现这些功能的前提是必须满足约束条件，比如：尺寸的限定，零部件承载或受压而不失效，绝缘、绝热或导电、导热，使得其在给定环境下某个温度范围内能够正常工作，甚至更多约束条件。在设计零部件过程中，设计者会有一个目标，或许是尽量便宜，或许是尽量轻，或许是尽量安全，抑或是这些目标的组合。

通过调整某些参数能够使目标最优化。设计者可以自由地改变设计未要求约束的维度，最重要的是自由选择零部件的材料。这些我们称之为自由变量。功能实现、约束条件、设计目标和自由变量（见表 5.1）界定了材料选择的边界条件，以及受载零部

表 5.1　功能、约束条件、目标和自由变量

功能	零件是用在哪里的
约束条件*	哪些不可协商的约束条件是必须满足的
	哪些可协商的约束条件是希望得到满足的
目标	哪些是需要最大化和最小化的
自由变量	哪些变量是可供设计者自由改变的

* 有时区分“硬性”“弹性”约束是有意义的，刚度和强度属于绝对要满足的要求（硬性约束）；成本是可以沟通的（弹性约束）。

件设计案例中的材料横截面形状。将设计要求和材料特性联系起来的第一步，就是对功能、约束条件、设计目标和自由变量的清晰阐述。

5.2.4 筛查：属性限制

客观的选择应将所有材料作为备选，直至某些材料被排除。整个过程遵循图5.5中“解读”下方的步骤。首先，排除那些不可能满足设计要求的材料，这些材料的一种或多种属性不在约束设定的属性范围内。例如，“零部件必须可以在沸水中工作”或“零部件必须是透明的”这样的设计需求，对材料的“最大工作温度”和“透光性”两个属性作了限制，要求合格的候选材料必须满足。我们将此称为属性限制。

头盔面罩的设计需求

安全头盔的面罩要求其材料对人脸提供最大程度的保护。

解读

为获得清晰的视野，面罩必须是透光的。为从顶部、侧面和底部全方位地保护面部，头盔必须是双曲面，即要求材料具有良好的成形性。由此我们形成了两个约束，即透明度和可成形性。

面罩的破裂会使得面部面临危险，所以安全系数的最大化可解读为材料抗断裂能力的最大化。衡量材料抗断裂能力的性能指标为断裂韧度 K_{IC}，因此最终设计目标是使得 K_{IC} 最大。

5.2.5 排序：材料指标

属性限制无法对候选材料进行排序。对此，我们需要借助最优化标准，这些标准可以从材料指标中获取。材料指标可以从实现设定目标的角度，来评价满足约束条件的候选材料的卓越程度。材料的表现优劣有时候会受限于某一种性能，有时候会受限于一些性能组合。例如，浮性最好的材料是密度最小的材料，绝热最好的材料是导热系数 λ 值最小的材料。不过，我们并不总是追求最小化。举例来说，对于热交换器而言，最好的材料是导热系数 λ 值最大的材料。这里我们所描述的某种性能的最大化或最小化，其目的是使得材料的表现最优化。但是我们知道，很多时候材料的表现不是受单一性能的影响，而是受多种性能组合的影响。对于轻质、牢固的拉杆或电缆，最佳材料是比强度值 σ_f/ρ 最大的材料，其中，σ_f 是断裂强度。弹簧的最佳材料是 σ_f^2/E 值最大的材料。其中，E 是弹性模量。对于某一特定设计，能够使表现最优的材料性能或性能组合，我们称之为该设计的材料指标。这样的指标有很多，每种指标都与某方面表现的最优化相关联。这些材料指标规定了卓越标准，由此我们可以根据材料在给定应用下的表现能力来对其进行排序。

对上述内容做简单概述，即“筛查”选出那些能够胜任任务的候选材料，“排序”则是从候选材料中挑出完成任务最好的材料。

头盔面罩的筛查与排序

寻找易于成形的透明材料，可以得到如下的清单。前四种材料是热塑性材料，后两种是玻璃。附录 A 中可以查到相应材料的断裂韧度值。

材　　料	平均断裂韧度 K_{IC}(MPa·$m^{1/2}$)
聚碳酸酯(PC)	3.4
纤维素乙酸酯(CA)	1.7
有机玻璃(丙烯酸 PMMA)	1.2
聚苯乙烯(PS)	0.9
钠钙玻璃	0.6
硼硅玻璃	0.6

约束条件的限制使得候选材料仅有六种。当采用断裂韧度加以排序后发现，排名靠前的三种材料分别是聚碳酸酯、纤维素乙酸酯和有机玻璃。

5.2.6 文档查阅

至此，我们得到了满足约束条件的材料列表，且按卓越标准进行了排序。此时，我们可以直接选择排在顶部的候选材料，但是这样做会有什么暗藏的弊端呢？这样做的优点和缺点是什么？它会有好的效果吗？简言之，它的信用等级怎么样？为了进一步做出决定，我们需要寻求每种候选材料的详细资料，即文档查阅（见图 5.5 底部）。

文档查阅与“筛查”步骤中应用的结构化性能数据有很大不同。一般地，文档是描述性文字、图表或是图片内容，包括材料以前的应用案例、失效分析及腐蚀过程，以及可用性和定价方面的信息等。这些信息可以在手册、供应商的数据表、应用案例研究和失效分析中找到。文档查阅有助于从材料候选单中找出最佳材料，实现设计需求和材料属性之间的最佳匹配。

为什么必须要经历这些步骤呢？没有筛查和排序，候选材料将浩如烟海，文档体积极其庞大。稍加研究，希望恰好找到一种好材料的做法会使人寸步难行。但是，通过“筛查”和“排序”步骤找到部分候选材料，然后再针对这几种材料进行文档查阅，这样整个任务就变得切实可行了。

头盔面罩材料的文档查阅

这一步有助于了解上一步所确定的排名前三的候选材料是如何应用的。以下内容可以通过网页快速搜索得到。

聚碳酸酯

安全面罩和护目镜、透镜、灯具、安全头盔、多层防弹玻璃。

纤维素乙酸酯

眼镜架、透镜、工具手柄、显示器外壳、装饰、汽车方向盘。

PMMA，树脂玻璃

各种类型的透镜、驾驶舱顶盖和飞机窗户、容器、工具手柄、照明设备、汽车尾灯。

结果是振奋人心的，所有三种材料都曾用作护目镜和保护屏幕的材料。排序中最高的是聚碳酸酯，有着用作保护头盔材料的历史。之所以最终敲定这种材料，是因为其断裂韧度很好，我们有理由相信这是最佳选择。

5.2.7 现实条件

在候选材料中做出最终选择通常要依托于现实条件，包括自身技术或装备，以及可找寻到的本地供应商等。系统程序此时就无法发挥作用了，必须结合现实条件才能做出决策。但是，这并不意味着系统程序的结果是无关紧要的。即便由于现实原因放弃某种材料，知道哪种材料最好也是很重要的。

后面的章节将重点介绍文档查阅，此处关注的是属性限制与材料指标的获取。

5.3 材料指标

约束条件为材料性能设定了限制条件，目标则定义了材料指标。对于这些指标，我们一般追求其极值。当设计目标和某个约束条件互不相关时，材料指标仅仅是一个简单的材料性能。相反，当两者联系在一起时，材料指标就变成像上述例子中提及的一组性能。那么，材料指标是如何得到的呢？本节我们将介绍这部分内容。

以一个最简单的机械零部件为例，零部件所受载荷通常可分解为轴向拉伸、弯曲、扭转和压缩的组合。在大多数情况下，以某一种受力模式为主导。因此，零部件的名字会直接反映其承载方式，比如承受拉伸载荷的杆、承受弯曲载荷的梁和板、承受扭转的轴承以及承压的柱。其中，“杆”“梁”“板”和“柱”都代表了一种功能。这里，我们将重点讨论约束条件和设计目标，以及由此产生的材料指标。

生活能耗和运输系统的废气排放主要产生于能源使用过程。系统越轻，能耗越少，碳排放越少。因此，好的出发点是轻量化设计。当然，前提必须满足所需的约束条件，即刚度和强度的要求。接下来，我们先考虑图 5.6 所示的通用组件，包括杆、板、梁及其载荷分布。

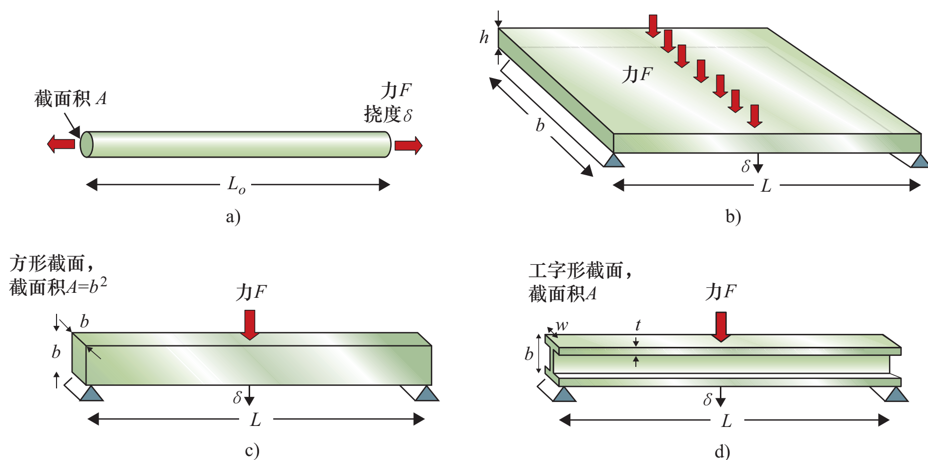


图 5.6 通用组件

a）杆：拉伸部件 b）板：承弯 c）、d）梁：承弯

1. 质量最小化：轻质高强度杆

要求设计出一种杆，类似本章封页上双翼飞机上的杆，能承受拉力 F^*，且质量尽可能轻（见图 5.6a）。杆的长度 L 给定，横截面面积 A 可根据需求调整。这里，“表现最优”意味着“质量最小化的同时能够安全地承受拉力 F^*”。表 5.2 列出了经解读后的设计需求。

表 5-2　轻质高强杆的设计需求

功能	连杆
约束条件	长度 L 是规定的(几何约束)
	杆必须在承受轴向拉力 F 下不失效(功能约束)
目标	质量最小化
自由变量	截面积 A
	材料的选择

首先，要寻找一个等式来描述某一性能的最大值或最小值。针对这个例子，我们期望杆的质量 m 最小。由此可形成下面的等式，作为目标函数。

$$m = AL\rho \tag{5.1}$$

式中，A 是横截面积；ρ 是材料密度。长度 L 和力 F 都是给定值，横截面积 A 是自由变量。我们可以通过减小横截面积来减少质量，但需满足一个约束条件，即 A 必须可以承受力 F^*。由此，要求：

$$\frac{F^*}{A} \leqslant \sigma_f \tag{5.2}$$

式中，σ_f 是抗拉强度。由式（5.1）和式（5.2）得到：

$$m \geqslant (F^*)(L)\left(\frac{\rho}{\sigma_f}\right) \tag{5.3}$$

（(F^*)——功能约束；(L)——几何约束；$\left(\frac{\rho}{\sigma_f}\right)$——材料性能）

观察式（5.3），第一个括号内是给定的外力 F^*，第二个括号内是给定的几何尺寸，即杆长度 L，最后一个括号内是材料性能。因此，能安全承受外力 F^* 的最轻质的杆，其组成材料有着最小的$\frac{\rho}{\sigma_f}$值。在这个问题中，我们可以将$\frac{\rho}{\sigma_f}$定义为材料指标，寻求其最小值。但是，较为普遍的做法是将所涉及的特定性能以求最大值的形式表示出来。因此，将式（5.3）中的材料性能进行转化，定义材料指标 M_t（下标 t 代表杆）为：

$$M_{t1} = \frac{\sigma_f}{\rho} \tag{5.4}$$

能够有效地承受力 F^* 且质量最轻的杆，其组成材料的 M_{t1} 值最大，称之为“比强度”（见图 4.6）。对于轻质刚性杆的计算也是类似（差别之处在于，给定的是刚度 S，而不是强度 σ_f），相应的指标表示为：

$$M_{t2} = \frac{E}{\rho} \tag{5.5}$$

式中，E 是弹性模量。此时，该指标 M_{t2} 称为“比刚度”（见图 4.6）。在这两个例子中，由于设计目标“质量 m 最小化”与约束条件“可承受外力 F”紧紧联系在一起，使得材料指标都以性能组合的方式出现，而非单一性能。

注意上述求解过程。杆的长度 L 给定，横截面积 A 可自由变化，最终目标要求质量 m 最小。由此，我们建立了一个 m 的表达式，即目标函数。但是，存在约束条件。对于第一个例子，杆承受 F 过程中不能屈服；对于第二例子，杆承受力 F 过程中不能过弯。基于上述约束，我们可消除自由变量 A，将问题转换成为求解性能组合 M 的最大值。这听起来很容易。事实上，如果一开始我们就清楚有哪些约束条件、设计目标是使什么达到最大或最小、哪些参数是给定的、哪些参数是自由变量，做起来并不难。

上面的例子比较简单，下面我们看一个稍微复杂的案例。

2. 质量最小化：轻质刚性板

板是类似桌面的平板。它的长度 L 和宽度 b 都是给定的，但厚度可变。通常，板受到图 5.6b 所示的中央载荷 F 的作用。刚度约束要求其挠度不能超过 δ，目标是质量 m 最小。表 5.3 对整个设计需求做了概括。

表 5.3 轻质高刚性板的设计需求

功能	板
约束条件	弯曲刚度 S 是规定的（功能约束）
	长度 L 和宽度 b 是规定的（几何约束）
目标	板的质量最小化
自由变量	板厚 h
	材料的选择

与杆一样，板的质量的目标函数可写为：

$$m = AL\rho = bhL\rho$$

弯曲刚度 S 至少为 S^*，即：

$$S = \frac{C_1 EI}{L^3} \geqslant S^* \tag{5.6}$$

式中，C_1 是一个常数，其值仅与载荷分布有关，可查阅附录 B；对于矩形截面，断面惯性矩 I 为

$$I = \frac{bh^3}{12} \tag{5.7}$$

我们可以通过减小高度 h 来减少质量，但前提是刚度约束条件必须满足。联立上述两式，消去 h，得到：

$$m \geqslant \underbrace{\left(\frac{12S^*}{C_1 b}\right)^{1/3}}_{\text{功能约束}} \underbrace{(bL^2)}_{\text{几何约束}} \underbrace{\left(\frac{\rho}{E^{1/3}}\right)}_{\text{材料性能}} \tag{5.8}$$

变量 S^*、L、b、C_1 都是给定的，剩下的只有材料可变。材料指标由一组材料性能表达，并求其最大值。对于轻质刚性板来说，最好的材料是下式取值最大的材料：

$$M_{p1} = \frac{E^{1/3}}{\rho} \tag{5.9}$$

用强度约束取代刚度约束，重复上述计算过程，可以得到类似的指标：

$$M_{p2} = \frac{\sigma_\gamma^{1/2}}{\rho} \tag{5.10}$$

这与之前例子中的指标 $\frac{E}{\rho}$ 和 $\frac{\sigma_\gamma}{\rho}$ 看起来似乎没有太大差别，但实际差别很大，会导致不同的材料选择。在接下来的章节中，我们会有所涉及。

接下来，我们来看一个弯曲的例子。在这个例子中，形状会对结果产生影响。

3. 质量最小化：轻质刚性梁

梁有很多形状，实体矩形、空心圆管、工字梁等。有些梁含有太多自由几何变量，无法直接应用前述方法。然而，如果把形状限制为自相似的（即横截面的各维度尺寸

与整体尺寸变化成比例），这个问题就可以迎刃而解。因此，我们分两步来考虑梁的问题。首先，针对简单形状（比如方截面）确定出轻质刚性梁的最佳材料。随后，确保刚度不变，探究形状的变化来实现减重。

考虑一个方截面（$A=b\times b$）的梁，保持截面形状不变的前提下改变截面尺寸。梁的长度为 L，如图 5.6c 所示，在其中心施加载荷 F，使梁发生弯曲。要求在力 F 作用下不能产生大于 δ 的挠度，同时使梁尽量轻。表 5.4 对整个设计需求做了概括。

表 5.4 轻质高刚性梁的设计需求

功能	梁
约束条件	长度 L 是规定的（几何约束）
	截面形状（几何约束）
	梁必须在承受弯曲载荷 F 下不剧烈弯曲，意味着弯曲强度 S 被指定为 S^*（功能约束）
目标	梁的质量最小化
自由变量	截面积 A
	材料的选择

参照之前的例子，质量目标函数为：

$$m=AL\rho=b^2L\rho \tag{5.11}$$

梁的弯曲刚度 S 至少为 S^*：

$$S=\frac{C_2EI}{L^3}\geqslant S^* \tag{5.12}$$

式中，C_2 是常数（附录 B）。对于方截面梁，断面惯性矩 I 为：

$$I=\frac{b^4}{12}=\frac{A^2}{12} \tag{5.13}$$

长度 L 给定，可以通过改变方截面的尺寸来调整 S^*。化简消去质量目标函数中的 b（或 A），得到：

$$m\geqslant\left(\frac{12S^*L^3}{C_2}\right)^{1/2}L\left(\frac{\rho}{E^{1/2}}\right) \tag{5.14}$$

S^*、L 和 C_2 的数值是已知的，轻质刚性梁的最佳材料为材料指标 M_{b1} 最大的材料，M_{b1} 的计算公式为：

$$M_{b1}=\frac{E^{1/2}}{\rho} \tag{5.15}$$

将式中的刚度约束换为强度约束，重复这一计算过程，可得到：

$$M_{b2}=\frac{\sigma_y^{2/3}}{\rho} \tag{5.16}$$

上述分析虽然是针对方截面梁的情况进行，但只要截面形状保持不变，分析结果适用于任何形状的梁。从式(5.13)可以看出，对于给定形状，惯性矩 I 总能表达为一个常数和 A^2 的乘积，所以形状改变只是改变了式(5.14)中的常数 C_2，并没有改变结果。

正如前面所提及的，梁截面的变化可以改善梁的承弯性能，从而用尽量少的材料获得同样的刚度。通过改变截面形状，可以在不改变 A 的情况下增大 I 的值。为得到较大的 I 值，可以尽量将材料分布在远离中性轴的位置，如图 5.6d 所示的薄壁梁或工字梁。鉴于各种材料的成形能力不同，在采用材料指标 M_b 值来进行材料选择时，需多加

小心。结合有效的截面形状，有时候 M_b 值低的材料反而能获得青睐。第 9 章将详细探讨这方面内容。

4. 材料成本最小化：便宜的杆、板和梁

当目标由质量最小化变为成本最小化时，相应的参数又将发生变化。如果材料的价格是 C_m（$/kg)，则质量为 m 的部件的材料成本是 mC_m。对于杆、板和梁，其材料成本 C 的目标函数为：

$$C=mC_m=ALC_m\rho \tag{5.17}$$

像前面一样，用 $C_m\rho$ 取代 ρ，可以得到形如式(5.4)、式(5.5)、式(5.9)、式(5.10)、式(5.15)和式(5.16)的式子。因此，对于给定刚度的杆，指导材料选择使得材料成本最小的指标为：

$$M=\frac{\sigma_f}{C_m\rho} \tag{5.18}$$

式中，C_m 是每千克材料的价格。对于价廉的刚性板，对应材料指标的表达式为：

$$M_{p1}=\frac{E^{1/3}}{C_m\rho} \tag{5.19}$$

注意：材料成本只是零件成本的一部分，总成本还包括制造成本（成形、连接以及精饰的成本）。

5. 材料指标与零件的关联

图 5.0 中的零件均标注了其受载支撑的类型以及用于指导材料选择的指标。双翼飞机是轻量化设计的典型，意味着所选择的材料在满足承载设计要求的前提下质量应最轻。机场建筑物通常需要使用大量的材料，因此设计目标是安全承受设计载荷的前提下材料成本应最低。每个结构的导向材料指标都来自于单一目标，即质量最小化、材料成本最小化。通常情况下，一个设计会涉及多个目标。比如选择自行车框架的材料，既希望质量最小，又希望成本最低。此时就需加以权衡，相关内容将在第 7 章中详细讲解。

接下来，我们用通用术语来描述上述方法。结构元件是用以实现物理功能的零部件，这些功能包括受载、传热以及储能等。简而言之，它们必须满足功能需求。以下是几个典型例子：杆必须承受一定的拉力；弹簧必须提供一定的回复力或存储一定的能量；热交换机必须在一定的热通量条件下进行传热等。

结构元件的性能 P 由三个因素决定：功能需求、几何形状以及组成材料的性能。P 可以描述成以下等式：

$$P=[(\text{功能需求},F),(\text{几何参数},G),(\text{材料性能},M)]$$

或

$$P=f(F,G,M) \tag{5.20}$$

式中，P 是性能度量，描述了零部件性能的某些方面，例如质量、体积、成本和寿命等；f 是函数符号。根据需求，选出使 P 值最大或最小的材料及其形状，就可以实现最佳设计。

当式(5.20)可写成式(5.21)的形式时，式中的三组参数可认为互不相关：

$$P=f_1(F)f_2(G)f_3(M) \tag{5.21}$$

式中，f_1、f_2 和 f_3 是独立函数，这里只进行简单相乘。事实证明，大多数情况是这样的。因此，最佳材料的选择可以脱离设计细节。对于任何几何形状 G 和功能需求 F，其最终选择都

是一样的。这样，最佳材料子集的选择无须解决整个设计问题，甚至可以不用知道 F 和 G 的所有细节，从而使问题大大简化。通过最大化 f_3（M）这个材料效率系数，或简称为“材料指标”，对于所有的 F 和 G 都可以使得性能最优化。剩下的部分，f_1（F）f_2（G）与结构效率系数或结构指标有关。这部分内容将在 5.6 节中作简要讨论。

如图 5.7 所示，功能、目标和约束的任一组合都会形成一个材料指标。材料指标既可以反映组合的特点，又可以体现零部件的功能。这类方法是通用的，在后续章节中会给出更多应用。表 5.5 给出了一些材料指标的例子，以及这些指标所描述的设计问题。附录 C 给出了更为全面的材料指标目录。新问题往往会对应新指标，下一章的案例分析将会说明这个问题。

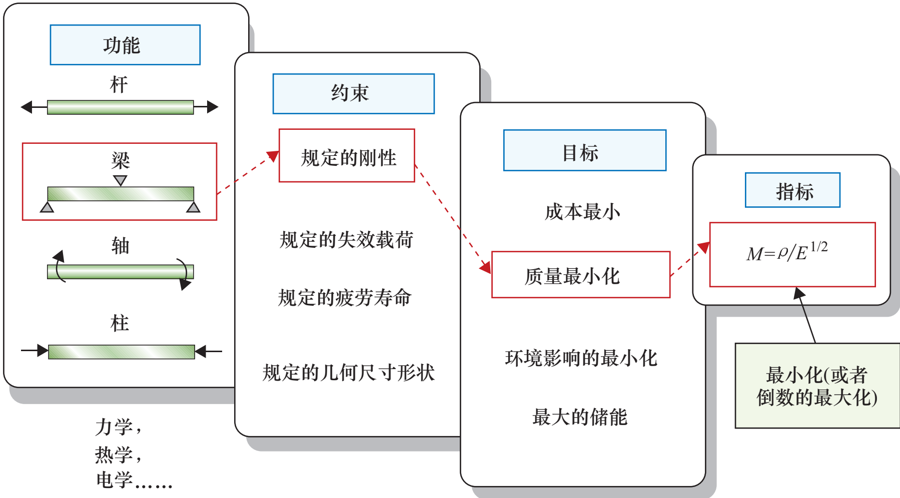


图 5.7　功能、目标和约束的组合对应不同的材料指标（高亮方框的组合对应指标 $E^{1/2}/\rho$）

表 5.5　轻质高强杆的设计需求

功能、目标和约束	指标
杆，质量最轻，规定刚度	$\dfrac{E}{\rho}$
梁，质量最轻，规定刚度	$\dfrac{E^{1/2}}{\rho}$
梁，质量最轻，规定强度	$\dfrac{\sigma_y^{2/3}}{\rho}$
梁，成本最低，规定刚度	$\dfrac{E^{1/2}}{C_m\rho}$
梁，成本最低，规定强度	$\dfrac{\sigma_y^{2/3}}{C_m\rho}$
柱，成本最低，规定弯曲强度	$\dfrac{E^{1/2}}{C_m\rho}$
弹簧，质量最轻，规定储能	$\dfrac{\sigma_y^2}{E\rho}$
绝热体，成本最低，规定热通量	$\dfrac{1}{\lambda C_p\rho}$
电磁铁，磁场最大化，规定的温升	$\dfrac{C_p\rho}{\rho_e}$

注：ρ = 密度；E = 弹性模量；σ_y = 弹性极限；C_m = 价格/kg；λ = 导热系数；ρ_e = 电阻率；C_p = 比热容。

5.4 选择过程

现在，我们可以将上述四个步骤组合成一个系统过程。

5.4.1 解读需求，提取材料指标

表 5.6 列出了步骤。简而言之，明确设计所约束的材料属性，决定将使用的卓越标准（最大化或最小化），利用约束条件替换自由变量，得出材料性能的组合，使目标达到最优。

表 5.6 解读

步骤号	步骤
1	定义设计需求
	功能：零件是用在哪里的？
	约束：必须满足刚度、强度、耐蚀性和成形特性等需求
	设计目标：哪些是需要最大化和最小化的
	自由变量：哪些是无约束变量
2	列出约束条件（没有屈服，没有断裂，没有弯曲等），在必要的情况下提出它们的公式
3	提出一个基于功能需求、几何形状以及材料性能（目标函数）的公式
4	定义自由（无需规定的）变量
5	利用约束条件替换自由变量
6	给变量分组：功能需求 F、几何参数 G 和材料性能 M
	性能度量 $P \leqslant f_1(F) \cdot f_2(G) \cdot f_3(M)$
	或性能度量 $P \leqslant f_1(F) \cdot f_2(G) \cdot f_3(M)$
7	读取材料指标表达为 M，将 M 作为卓越标准，以此优化性能度量 P

5.4.2 筛查：应用属性限制

任何设计都会对产品本身的材料提出某些必须满足的要求或约束。本章前面内容已讲述了如何将这些要求或约束解读为材料属性限制条件。图 5.8 是依据第 4 章的作图方法得到的 E-ρ 图，属性限制条件以水平线或垂直线的形式标示于图中。假设设计要求 $E>10\text{GPa}$ 且 $\rho<3000\text{kg/m}^3$，那么寻优筛查就会被限制在如图所示由约束条件框起来的范围内，称为“搜索区域”。

少数可以计量的性能，如耐蚀性、耐磨性、可成形性，也能够以约束的形式出现：

$$A>A^* \text{ 或者 } A<A^* \tag{5.22}$$

式中，A 是属性（如工作温度）；A^* 是该属性的临界值，由设计所决定。A 必须大于或者小于该临界值（如磨损率）。

在应用属性限制的时候不能过于草率，有时候设计一个迂回路线就有可能满足该限制。例如，温度过高的部件可以施以冷却，容易被腐蚀的部件可以镀一层保护金属。很多设计者们对断裂韧度 K_{IC} 和伸长率 ε_f 应用属性限制条件，作为经验法则，坚持要求材料满足 $K_{\text{IC}}>15\text{MPa}$ 且 $\varepsilon_f>2\%$，以确保能抵御应力集中。

这种做法使得一些材料被草率地排除，但对于富于创新的设计者而言，这些材料可以被很好地用起来。在设计过程中，仅仅采用 K_{IC} 和 ε_f 这类限制就排除所有的聚合物和陶瓷，是一种非常草率的做法。在这一阶段，我们应尽量保留更多选择。

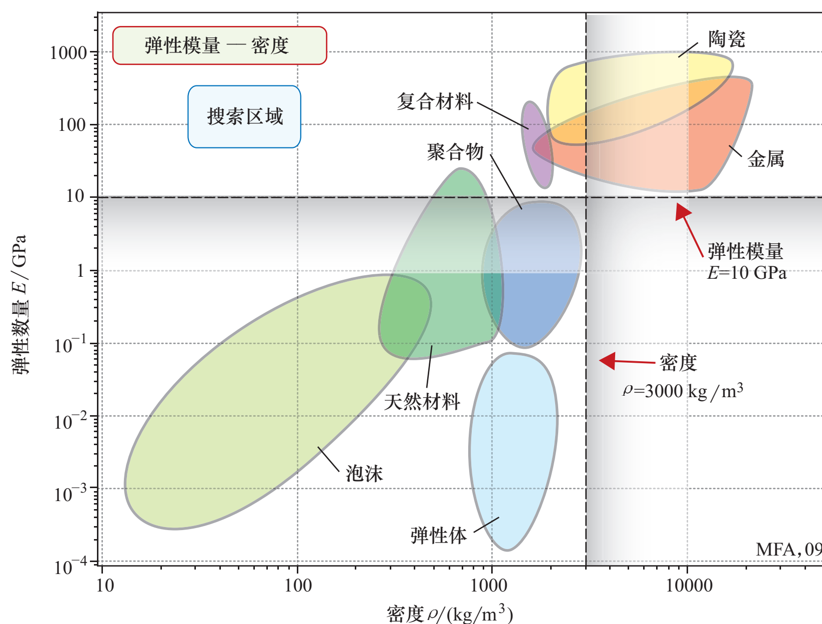


图 5.8　弹性模量 E 与密度 ρ 的关系图（根据设计要求显示了 E 的下限和 ρ 的上限。）

5.4.3　排序：图表中的材料指标

下一步是在满足约束条件的材料中挑选使得性能最优的材料。接下来我们以轻质刚性部件的设计为例。其他材料指标的应用与之类似。

图 5.9 中纵坐标是弹性模量 E，横坐标是密度 ρ，二者均采用对数坐标。材料指标 E/ρ、$E^{1/2}/\rho$、$E^{1/3}/\rho$ 都可绘制在图中。

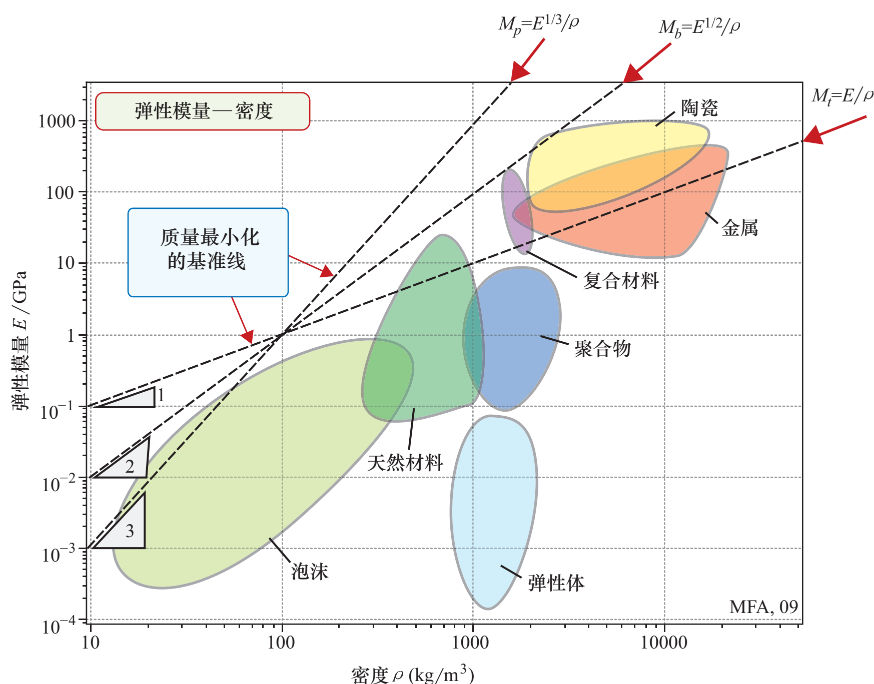


图 5.9　弹性模量 E 与密度 ρ 的关系图（图中三条基准线对应轻质刚性设计的三个材料指标。）

对于

$$\frac{E}{\rho}=C$$

或用对数形式表示：

$$\lg E=\lg\rho+\lg C \tag{5.23}$$

在图中，lgE-$lg\rho$ 是一组斜率为 1 的平行线系，每条线都对应一个 C 值。

对于

$$\frac{E^{1/2}}{\rho}=C \tag{5.24}$$

或用对数形式表示：

$$\lg E=2\lg\rho+2\lg C \tag{5.25}$$

由此在图中可得到一组斜率为 2 的平行线系。同样地：

$$\frac{E^{1/3}}{\rho}=C \tag{5.26}$$

是一组斜率为 3 的平行线系。这些直线称为选择基准线，给出了对应某个材料指标的平行线系的斜率。第 4 章的图给出了类似的基准线。

通过这种方式，对于任意加载情况和几何形状，很容易找到表现最优的材料子集。所有位于 $E^{1/3}/\rho$ 基准线上的材料用作轻质刚性板，其性能表现基本一致。对于线上方的材料，性能表现相对好一些，而在线下方的材料，其性能表现则比较差。图 5.10 给出了 $E^{1/3}/\rho$ 的值从 0.2 变化到 5（单位是 $GPa^{1/3}/(Mg\cdot m^{-3})$）的一系列基准线。同等刚度条件下，对应 $M=2$ 的材料做成的板，重量只有对应 $M=0.2$ 的材料做成的板的十

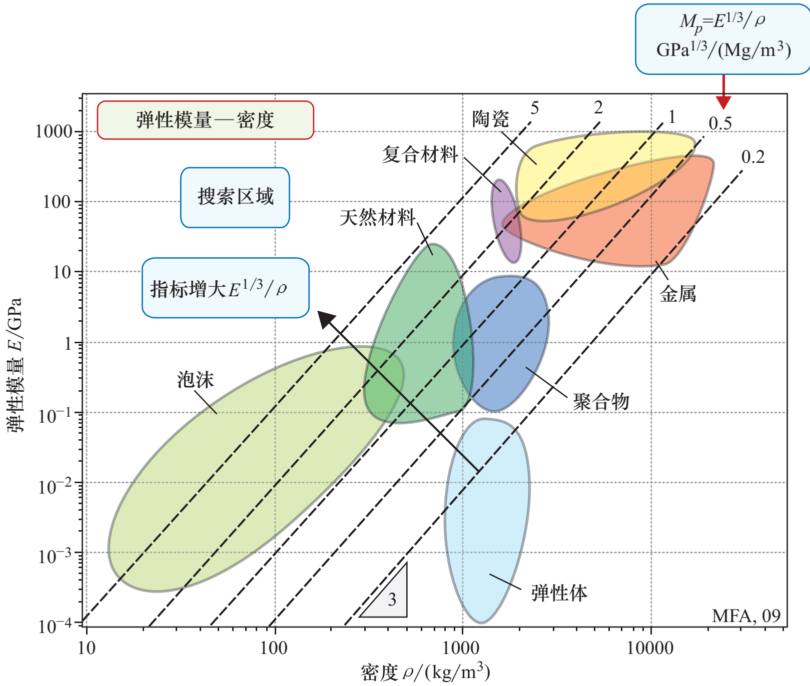


图 5.10 弹性模量 E 与密度 ρ 的关系图（给出了对应材料指标 $M=E^{1/3}/\rho$ 的基准线分布情况。）

分之一。类似图 5.11 所示的对角基准线，我们可以采用基准线隔离出包含适量候选材料的搜索区域，在此基础上确定满足特定材料指标的材料子集。通过叠加属性限制，可进一步减小搜索区域。例如，图中给出了对应 $E>50\text{GPa}$ 的水平线。搜索区域内的材料都满足这两个条件。基准线的下移或上移，会使得候选材料的数量相应的增多或减少。

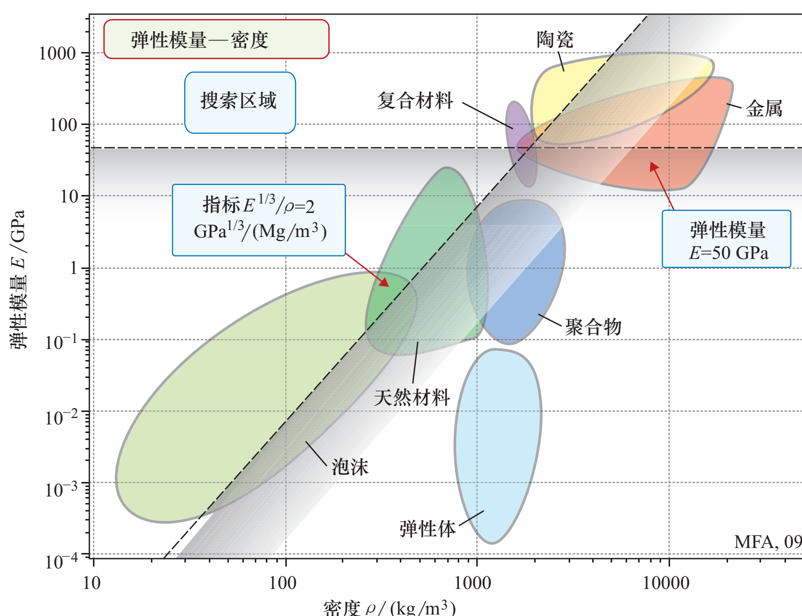


图 5.11　基于材料指标 $M=E^{1/3}/\rho>2\ \text{GPa}^{1/3}\cdot(\text{Mg/m}^3)$ 和属性限制 $E>50\text{GPa}$ 进行材料选择（搜索区域内的材料将成为下一阶段的候选材料。）

5.4.4　文档查阅

现在，我们已经得到一份排好序的候选材料清单，最后一步是更为深入地研究它们的特性。通常情况下，有一些约束条件不能表示为简单的属性限制。很多条件都与特定环境下材料的行为相关，或与材料成形、连接以及精饰的方式相关。这些信息可以在手册、制造商数据表和网站资源中找到。

从某种程度上来讲，由于缺乏深入地研究，一些约束条件可能会被忽视。这时，借助材料设计指南，案例分析和失效分析，建立一个包含材料优缺点以及如何克服缺点的详细卷宗是非常有帮助的。上述信息都源于文档查阅，附录 D 列举了这些文档的来源。

5.5　计算机辅助选择

第 4 章的图给出了材料性能的概览，然而在图中可显示出来的材料数量是十分有限的。此外，当约束条件很少时，利用这个图是可行的。但当约束条件很多时，问题就会变得很棘手。对于上述两个问题，我们可以采用计算机方法来解决。

CES 材料及其工艺选择软件是一个典型的应用实例。数据库包含材料的记录，以

前述图 5.2 所示的分层方式加以组织。每项记录包含材料的结构化属性数据，每种属性存有其典型的取值范围或所允许的取值范围。此外，数据记录还包含有限的关于该材料的文档，以文本、图像和信息资料来源的形式存在。这些数据由搜索引擎进行查询，其搜索界面如图 5.12 所示。左侧是一个简单的查询界面，采用单一性能来进行筛查操作（第 3 章图 3.0 是一个实例）。输入约束属性的上限或者下限，搜索引擎会排除所有处于属性值范围外的材料。中间是另外一种查询数据的方法，类似于图 4.1 所示的柱状图。

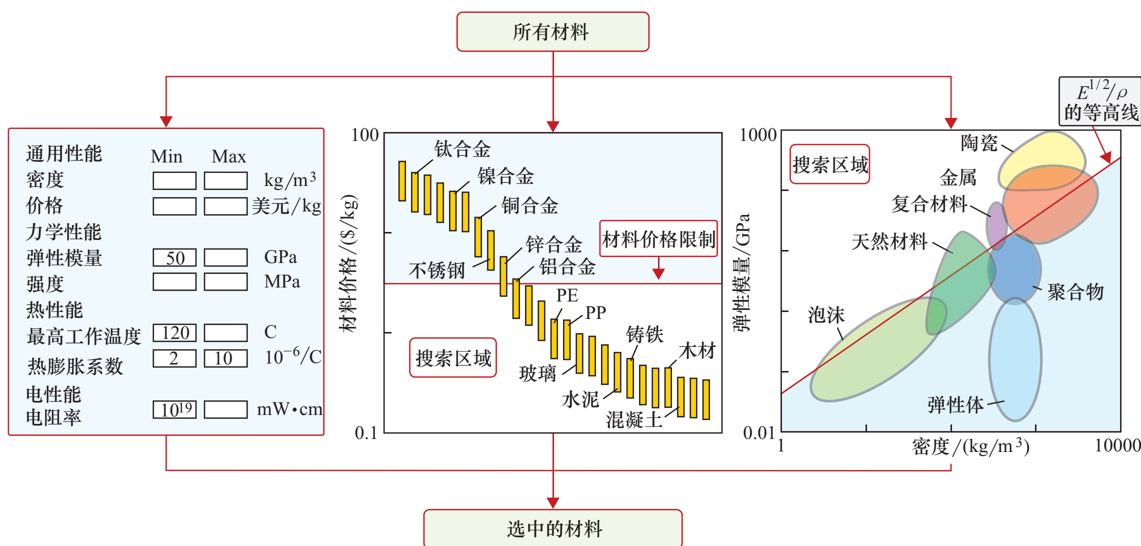


图 5.12 利用 CES 软件进行计算机辅助选择（上图显示了三类选择窗口，它们能够以任意顺序和组合形式进行使用。这种选择机制能够挑选出通过所有选择阶段的材料子集。）

柱状图和图 5.12 右侧的泡泡图都可应用约束条件和排序进行搜索。将边界为属性约束值的选择基准线或选择框叠加在表中用于材料排序，就可以排除那些处于阴影区域的材料，留下满足所有约束条件的材料。当所有必要的约束条件都用来排序后，基准线和方框的定位完成，此时选择区域内只剩下很少的材料。这部分材料是最优秀的候选材料。

5.6 结构指标

关于结构优化设计的书（例如 1960 年 Shanley 的著作）一致认为机械负载零部件的材料利用率取决于产品的三个因素。一是本章定义的材料指标；二是第 9 章描述的形状因数；三是结构指标，包含式(5.21)中的要素 G 和 F。本书的主题——材料及其工艺的选择——主要涉及材料指标和形状。然而，简要地校验一下结构指标也是必要的，一是与优化设计的经典理论联系起来，另外一个原因是当结构尺寸比例缩放时，这种方法非常实用。

在质量最小化的设计例子中（式(5.3)，式(5.8)和式(5.14)），设计效率可由 m/L^3 的值来衡量。将用于设计轻质高强度杆的式(5.3)两边同时除以 L^3，可得到：

$$\frac{m}{L^3} \geqslant \left(\frac{F^*}{L^2}\right)\left(\frac{\rho}{\sigma_f}\right) \tag{5.27}$$

同样，将用于设计轻质刚性板的式（5.8）两边同时除以 L^3，可得到：

$$\frac{m}{L^3} \geqslant \left(\frac{12}{C_1}\right)^{1/3}\left(\frac{b^2 S^*}{L^3}\right)^{1/3}\left(\frac{\rho}{E^{1/3}}\right) \tag{5.28}$$

将用于设计轻质刚性梁的式（5.14）两边同时除以 L^3，可得到：

$$\frac{m}{L^3} \geqslant \left(\frac{12}{C_2}\right)^{1/2}\left(\frac{S^*}{L}\right)^{1/2}\left(\frac{\rho}{E^{1/2}}\right) \tag{5.29}$$

m/L^3 与密度的量纲一致。其值越小，则给定尺寸下的结构越轻，因此结构效率就越高。式(5.28)和式(5.29)右边第一个括号中的数值是常数，三个式子最后一个括号里的数值是材料指标。剩下那部分，式(5.27)中的 $\frac{F^*}{L^2}$、式(5.28)中的 $\frac{b^2S^*}{L^3}$ 和式(5.29)中的 $\frac{S^*}{L}$ 称为结构指标。结构指标与应力的量纲一致，是载荷强度的一种衡量方式。对于结构指标相同的任意尺寸结构，等比例设计对应的最优化结果（最大限度减少材料用量）对其也同样是最优化的。在本章中，关于性能度量的表达式将结构指标单独分解了出来。在第 6 章的案例研究中，我们将沿用这一处理手法。

零部件成本最小化的结构指标与质量最小化的结构指标是一样的。

5.7 本章小结

材料选择过程分为以下四个步骤：

解读——从功能、约束条件、目标和自由变量等角度重新解读设计要求。

筛查——从约束条件中得到材料属性限制，并应用这些限制条件选出符合要求的材料子集。

排序——采用材料指标对候选材料进行排序，或者以某些卓越标准对候选材料进行排序。

文档查阅——对排在顶部的候选材料进一步查阅文献，研究各个材料的应用历史、特定应用、在相关环境中的表现和可用性等等方面，直到形成足够详细的画面，完成最后的决策。

在完成任务时，第一步我们应阅读硬拷贝的材料性能图表，这样可以确保足够的视觉宽度，也就是说将所有材料种类都囊括在内。然而，材料种类繁多，每种材料又有多种性能，以材料组合得出的材料指标不计其数，所以打印出一个包含所有情况的图表是不切实际的。但是这些问题可以通过计算机来解决，因为计算机可以搜索到所有的材料，而且必要时，能够提供相应材料的详细信息。

在第 7 章中，本章的选择过程将被扩展用于处理多重约束与目标的设计问题。在第 9 章中，该选择过程将涵盖截面形状设计问题。在此之前，第 6 章中我们将给出一些案例研究，以强化本章中的一些概念和思想。

5.8 扩展阅读

下面这些书籍介绍了优化方法及其在材料工程中的应用。

1）Arora，J. S. （1989）. *Introduction to optimum design*. McGraw-Hill，ISBN 0-07-002460-X.

一本介绍优化理论术语和方法的书籍。

2）Ashby，M. F.，Shercliff，H. R.，& Cebon，D. （2007）. *Materials：Engineering，science，processing and design*. Butterworth-Heinemann，ISBN 978-0-7506. 8391-3.

一本基础书籍，通过材料属性图表的方式来介绍材料，并基于案例形成相应的材料选择方法。

3）Dieter，G. E.（1999）. *Engineering design，a materials and processing approach*（3rd ed）. McGraw-Hill，ISN 9-780-073-66136. 0.

一本通情达理、受人尊敬的书籍，注重于技术设计中材料与工艺的定位。

4）Gordon，J. E. （1976）. *The new science of strong materials，or wliy you don’t fall through the floor*（2nd ed.）. Penguin books，ISBN 0-1402-0920-7.

这本书非常易读，与材料的塑性与断裂相关，描述了如何通过材料设计来避免这些问题。

5）Gordon，J. E.（1978）. *Structures，or why things don’t fall down.* Penguin Books，ISBN 0-1402-1961-7.

上一本书的姊妹篇，介绍的是结构设计。

6）Shanley，F. R.（1960）. *Weight-strength analysis of aircraft structures*（2nd ed.）. Dover Publications Library of congress Number 60-50107.

一本非常好的关于轻量化结构设计的书籍，已不再印刷。

第 6 章

案例分析：材料选择



图 6.0　英国剑桥大学划桨手（感谢安德鲁・邓恩提供照片）

6.1　引言

本章将基于一组案例分析来详细讲解第 5 章的材料选择方法。为避免过多纠缠于细节，所有案例均刻意采用简化模型，以便将材料选择方法阐述清楚。绝大多数案例并没有因为模型的简化而降低有效性。应该说，简单案例采用的最佳材料选择方法同样适用于复杂情形，相关原因已在本书第 5 章 5.3 节中给出。

每个案例都是按照下述模式进行展示：

◇ 描述问题，设定场景。

◇ 解读——明确功能、约束、目标和自由变量，从而得出属性限制条件和材料指标。

◇ 选择——通过筛查和排序，从所有材料中找出小部分可用的候选材料。

◇ 附言——对结果和原理加以评注。

前几个案例简单明了，后面的案例相对复杂一些，需要清晰地思考才能找出并区

分设计目标与约束条件。目标和约束条件的混淆不清将导致奇怪甚至错误的结论。这时我们可以应用一些常识来进行判断。例如，候选材料清单中是否有用于该应用的传统材料？是否有材料子集明显不合适？如果是这样，很有可能是忽略了某个约束条件或误用了某个设计目标。面对这种情况，我们必须重新审视整个选择过程。

本章中的大多数案例都是采用第 4 章中的硬拷贝图来实施，最后的一些案例阐述了计算机辅助选择的方法。

6.2　船桨材料

划艇的发明要归功于古埃及人。有关船以及桨的最早记载源于公元前 3300 年—公元前 3000 年间埃及人雕刻的纪念碑。在蒸汽动力出现以前，船是由撑篙、帆或者桨来驱动。相比其他两种工具而言，桨更易于控制，可用于军事用途。罗马人、维京人和威尼斯人深谙此道。

伦敦泰晤士河的划船比赛记录可以追溯到 1716 年。起初参赛选手都是船工，比赛的船只是用来把人和货物运到河对岸的渡船。渐渐地，一些绅士尤其是牛津和剑桥的一些年轻人也对此产生了兴趣，他们的加入使得该项运动的规则趋于成熟，装备也变得更加先进。促使船和船桨真正快速发展的是 1900 年划船被列入奥林匹克运动项目。从那时起，工匠技术和材料发展都进入鼎盛时期。下面以船桨作为例子加以说明。

1. 解读

从力学角度看，船桨可以简化为梁，承受弯曲载荷。它必须要有足够的强度，不被划桨人施加的弯矩所折断；还必须要有一定的刚度，能跟上划桨人的节奏，同时，还要有良好的触感。其中，强度约束易于满足，所以设计的主要问题就落在刚度上，即控制给定载荷下所产生的弹性挠度。

图 6.1 上半部分给出了船桨的示意图。桨叶连接在桨柄上，在桨柄中间位置加上套筒和项圈与桨架配合。图 6.1 下半部分说明了刚度的测量方法。在距离项圈 2.05m 处悬挂质量为 10kg 的重物，然后测量该点的挠度 δ。软桨的挠度差不多是 50mm，而硬桨只有 30mm。选购船桨时，桨手会特别在意桨的软硬程度。

除此之外，船桨必须轻，因为额外的重量增加了船体与水的接触面积，从而增加了运行时所受的阻力。对此问题的解读如下：船桨需具有一定刚度，同时质量最小。材料指标在第 5 章中已经给出推导，见式(5.15)。对于轻质刚性梁，材料指标为：

$$M=\frac{E^{1/2}}{\rho} \tag{6.1}$$

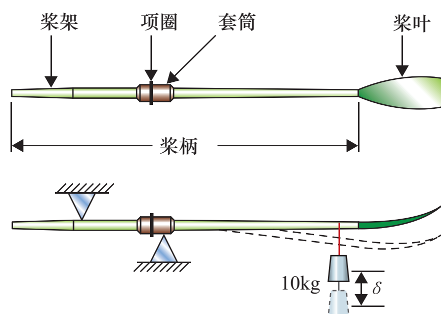


图 6.1　船桨示意图及其刚度测量方法

式中，E 是弹性模量；ρ 是材料密度。还有一些其他的约束不能忽略，如船桨脱落和桨叶碰撞。考虑到这些情况，材料必须要有足够的韧性，因此脆性材料（冲击韧度 G_{IC} 小于 $1\mathrm{kJ/m^2}$）无法使用。表 6.1 对上述提到的所有设计要求进行了归纳。据此，你会选择什么材料制作船桨呢？

表 6.1 船桨设计需求

功能	船桨——意味着轻质刚性梁
约束条件	指定的长度 L
	指定的弯曲挠度 S^*
	韧度 $G_{IC}>1\mathrm{kJ/m^2}$
目标	质量最小化
自由变量	轴的半径
	材料的选择

2. 选择

图 6.2 中给出了弹性模量 E 与密度 ρ 的关系图，图中指标 M 的基准线是一条斜率为 2 的直线。位于直线左上方的少部分材料有着最大的 M 值，若能满足其他约束条件(例如韧度约束)，这些材料就是最佳选择。表 6.2 列出了候选的四类材料：竹、木材、碳纤维增强复合材料和陶瓷。由图 4.7 的断裂韧度—弹性模量图表可知，陶瓷易碎，因此所有的陶瓷材料都不满足上述设计要求。撇开陶瓷，剩下木材和碳纤维增强复合材料，你会选择哪种材料呢？

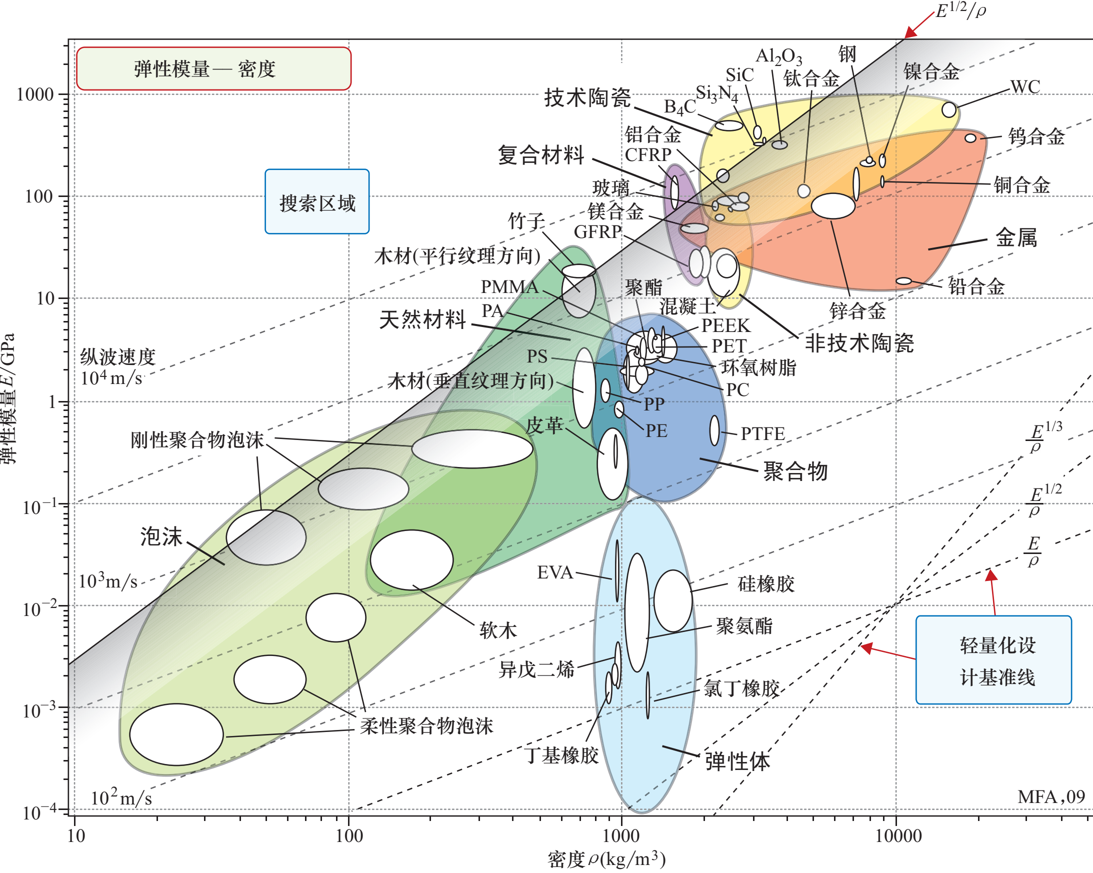


图 6.2 船桨材料的选择（CFRP 比木材要好，因为前者的结构易于控制。）

3. 附言

现在我们知道应该用什么材料制作桨了，但实际中用的是什么材料呢？比赛用桨要么是木材，要么是高性能的复合材料，即碳纤维增强环氧树脂。

表 6.2 船桨材料的选择

材料	指标 $M/[GPa^{1/2}/(Mg/m^3)]$	备注
竹	4.0~4.5	传统小舟的船桨材料
木材	3.4~6.3	价格低廉、传统，但具有天然差异性
碳纤维增强复合材料	5.3~7.9	和木材拥有相似的优点，性能更可控
陶瓷	4~8.9	对应 M 较好，但是韧度较低，成本较高

与 100 年前一样，木桨主要由工匠手工制成。桨柄和桨叶材料取自美国北部或者加拿大的北美云杉，越往北越好，因为每年短暂的生长期使得树木的质地更好。木材被切成条状，挑选其中的四片压在一起以平衡刚度。然后，将桨叶和桨柄粘接起来。初成形的桨需要搁置几个星期，等结构稳定后，再进行手工切削和抛光操作。最终的成品船桨大约重 4~4.3kg。

在相同刚度下，复合材料制成的桨柄比木材要轻一些。在环氧树脂基体中加入碳纤维和玻璃纤维，然后组装黏接在一起形成零部件。复合材料的优点一方面是质量更轻（通常重约 3.9kg），另一方面是性能可控。桨柄可按买家提出的刚度要求进行定制。曾经 CFRP 船桨的价格比木桨要高很多，但是近年来随着碳纤维价格的大幅度下降，两者的价格现在已基本持平。

我们还能做得更好吗？至少从传统制造方法来看，木材和 CFRP 两种材料制作出来的桨都已最轻质。但是，表中没有列出的新型复合材料可能会使得质量更轻。此外，功能梯度材料（例如极薄的刚性外壳和低密度的内核）也有可能做到这一点。但就目前而言，上述两种设想都还没实现。

相关阅读：

Redgrave, S. (1992). *Complete book of rowing* Partridge Press

相关案例：

见“大型望远镜的反光镜”（见 6.3 节）、“桌腿材料”（见 6.4 节）、“人力飞机翼梁”（见 10.2 节）、“竞赛用自行车前叉”（见 10.3 节）。

6.3 大型望远镜的反光镜

在这个世界上存在着一些大型光学望远镜，用于茫茫天际的搜寻工作。为保持精度，很多新建的望远镜利用了许多复杂和巧妙的技术。这将在附言中进行详细描述。但是，如果你仅仅想要一个简单的望远镜，那么采用单块硬镜作为反光镜即可。最大的望远镜坐落在俄罗斯高加索山脉的 Zelenchukskaya 附近的 Semivodrike 山上，反光镜直径是 6m。为了保证足够刚度，反光镜由大约 1m 厚的玻璃组成，重达 70t。

这么大一台望远镜的总成本是一个天文数字，约 3 亿美元。反光镜本身的成本约占总成本的 5%左右，剩下的是观测时用于支撑、固定以及移动的机械装置的成本。该机械装置必须要有足够刚度将反光镜加以固定，且相对于收集系统的位置精度必须与光的波长精度一致。初看起来，反光镜的质量 m 扩大一倍时，支撑结构的截面也扩大一倍就可保证应力不变（由此应变和位移也不变）。实则不然，支撑结构在自重的作用

下会发生更大的变形。因此，截面要按 m^2 加倍，成本亦然。

一个世纪以前，反光镜由镜用合金制成（其密度大约是 8000kg/m^3）。随后，材料又改为玻璃（密度是 2300kg/m^3），前表面镀银，所以并没有用到玻璃的光学特性，而是由于其力学性能才得以入选。70t 的玻璃恰好能支撑 100nm（大约 30g）的银。以全新的视野看反光镜材料，能否找到一条可行的工艺路线，制造出更轻更便宜的望远镜呢？

1. 解读

简而言之，反光镜可以看作如图 6.3 所示的一个直径为 $2R$ 的圆盘，平均厚度为 t，仅在边缘有支撑。反光镜在自身质量 m 的作用下，水平放置时会发生偏转，而在竖直放置时则没有显著变形。这种畸变会改变焦距从而带来像差，因此必须足够小，才不会影响反光镜的性能。在实践中，镜片中心的挠度 δ 必须小于光的波长。此外，要求具有较高的尺寸稳定性（没有蠕变）和较低的热膨胀性（见表 6.3）。

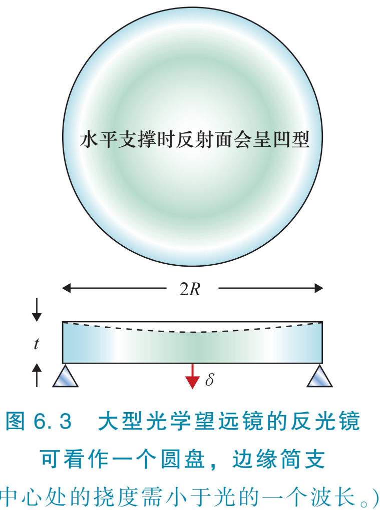


图 6.3 大型光学望远镜的反光镜可看作一个圆盘，边缘简支（中心处的挠度需小于光的一个波长。）

表 6.3 望远镜镜面设计需求

功能	镜面精度高
约束条件	指定的半径 R
	在自重影响下，挠度不能大于 δ
	尺寸稳定性高：没有显著变形，热膨胀系数小
目标	质量最小化
自由变量	镜面厚度 t
	材料的选择

反光镜的质量可采用式(6.2)计算：

$$m = \pi R^2 t\rho \tag{6.2}$$

式中，ρ 是材料密度。对于泊松比为 0.3（见附录 B）的材料，水平放置的圆盘因其自重引起的中心挠度 δ 是可以计算的。计算公式如下：

$$\delta = \frac{3}{4\pi}\frac{mgR^2}{Et^3} \tag{6.3}$$

式中，g 是重力加速度，取 9.81m/s^2；E 是弹性模量。挠度必须小于 10μm，直径 $2R$ 是由望远镜的设计要求决定，厚度 t 是自由变量。由式(6.3)转化得到 t 的表达式，然后代入式(6.2)中得到：

$$m = \left(\frac{3g}{4\delta}\right)^{1/2} \pi R^4 \left(\frac{\rho}{E^{1/3}}\right)^{3/2} \tag{6.4}$$

材料的指标 M 值最大，对应的反光镜最轻：

$$M = \frac{E^{1/3}}{\rho} \tag{6.5}$$

剩下的约束可以看作属性限制条件，即要求材料熔点高于 500℃ 以避免蠕变，零湿度以及低热膨胀系数（$\alpha < 20\times10^{-6}$/K）。

2. 选择

本例也是一个面向轻质的设计，参考图也是弹性模量 E 和材料密度 ρ 的关系图。

不过，如图 6.4 所示，图上的基准线斜率为 3，对应材料指标 $M=E^{1/3}/\rho$ 的某个常数值。玻璃的材料指标 $M=1.7$（$GPa^{1/3}\cdot m^3/Mg$）。M 值越大的材料越好，反之越差。玻璃比钢铁和镜用合金要好得多（这就是为什么大多数反光镜都是用玻璃做的），但是玻璃又比不上镁合金、个别陶瓷、碳纤维和玻璃纤维增强聚合物，或者某种未知的刚性聚合物泡沫。表 6.4 列出了应用属性限制条件前的候选材料。

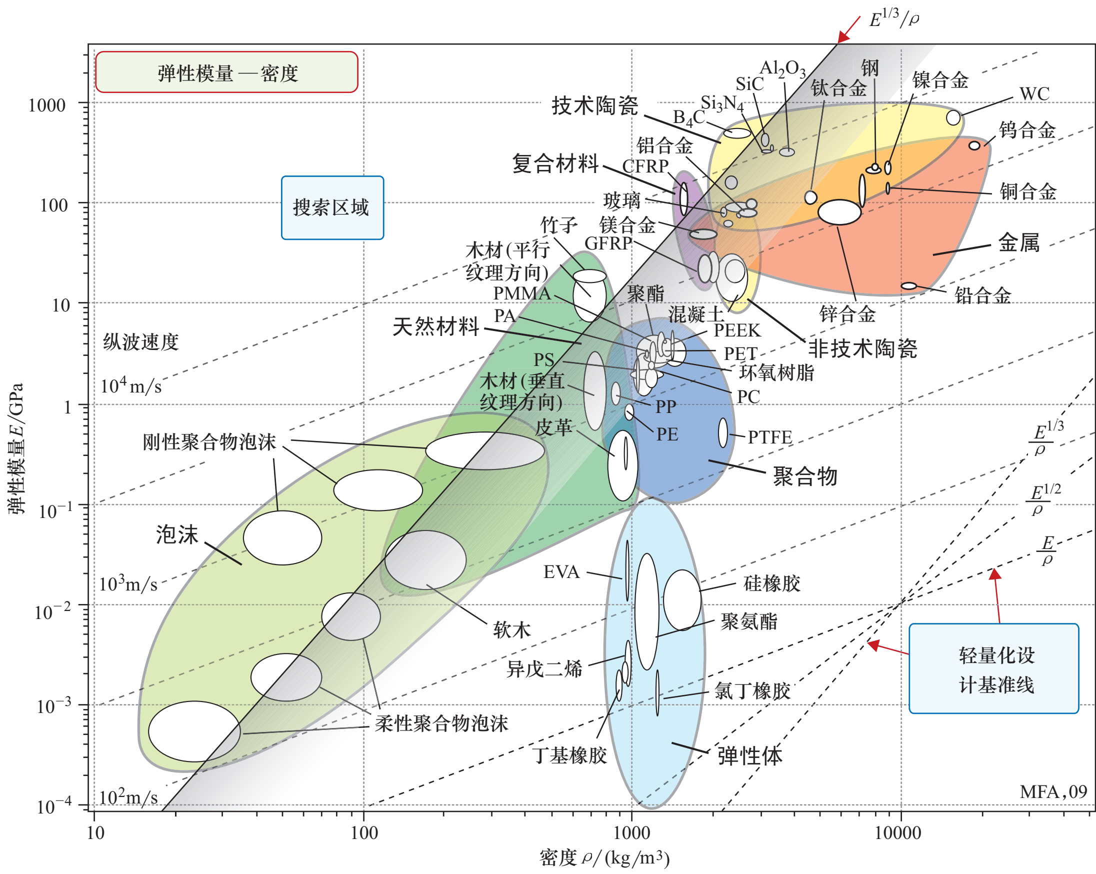


图 6.4 望远镜反光镜材料的选择（除镁合金外，玻璃的表现优于大多数金属材料。虽然碳纤维增强聚合物材料做成的反光镜质量最小，但是尺寸稳定性较差。泡沫玻璃是一种可能的候选。）

表 6.4 望远镜的镜面支撑（直径 5.1m）

材料	$M=(E^{1/3}/\rho)$ /$(GPa^{1/3}\cdot m^3/Mg)$	m/t（见式(6.4)）	备注
钢铁	0.74	73.6	很重——最初的选择
玻璃钢	1.5	25.5	尺寸稳定性不是很好，用于无线电望远镜
铝合金	1.6	23.1	比玻璃重，且热膨胀系数较高
玻璃	1.7	21.6	当前的选择
镁合金	1.9	17.9	比玻璃轻，但热膨胀系数较高
碳纤维	3.0	9	很轻，但尺寸稳定性不好，用于无线电望远镜
泡沫聚苯乙烯	4.5	5	很轻，但尺寸稳定性不好，泡沫玻璃？

当然，候选材料的其他方面也必须满足条件。表 6.4 中列出了根据式（6.4）计算得到的反光镜质量。CFRP 反光镜的质量还不到玻璃反光镜的一半，因此支撑结构的成本只有后者的四分之一。用泡沫可以更轻，但它们能制成反光镜吗？

有些材料如泡沫聚苯乙烯或 CFRP，乍看起来不太实际，但鉴于它们具备节约成本的巨大潜力，因此值得一试。可以将硅橡胶或者环氧树脂薄膜镀在反光镜背面，得到平滑表面以便于镀银。显著的缺点是聚合物缺乏稳定性，尺寸会随着时间、湿度和温度等的变化而发生改变。但是玻璃却可以碳纤维强化，也能被泡沫化从而得到密度比泡沫聚苯乙烯大，但比传统玻璃轻得多的材料。泡沫玻璃和碳纤维强化玻璃都有着与传统玻璃相同的化学性能和环境稳定性。这些材料可用于制作价廉物美的大型反光镜。

3. 附言

当然，我们还有很多方面可以改善。严格的设计标准（如 $\delta<10\mu m$）可以通过工业设计达到，无需涉及材料选择。位于夏威夷莫纳克亚山的长为 8.2m 的日本望远镜和位于智利帕拉纳尔山的巨型望远镜（VLT）都有很薄的玻璃反光镜，背后由一排液压或压电千斤顶支撑，并随着反光镜的姿态变化而变化。同样位于莫纳克亚山的 Keck 望远镜被分为多个部分，每个部分独立定位，形成光学聚焦。然而，这类机械装置的缺点在于它仍然对反光镜有刚度要求。当进行最小重量下的刚度设计时，材料的选择标准保持不变。

对于无线天文望远镜而言，它的尺寸精度不需要像光学望远镜那样精准，因为它是通过波长约为 0.25mm 而非 0.02mm 的长波来探测辐射。但是它的体型要大得多（60m 而非 6m），并且也面临由于自身重力导致的变形问题。最近，东京大学制造的一台 45m 无线天文望远镜，采用 6000 块 CFRP 板拼成抛物面反光镜。每一块板都采用伺服控制，以补偿宏观变形。正如我们前面所分析的，现如今的无线天文望远镜通常由 CFRP 制成。

相关案例：

见“用于精密仪器的低热变形材料”（见 6.16 节）。

6.4 桌腿材料

家具设计师 Luigi Tavolino 设想了一张极其简单的轻质桌子，如图 6.5 所示，细长的圆柱形桌腿支撑一张平整的钢化玻璃。桌腿必须是实心的（确保细长）且尽量轻（方便移动），同时桌子承载时要保证桌腿不会失稳。表 6.5 是相应的设计需求。对此，你会推荐什么材料呢？

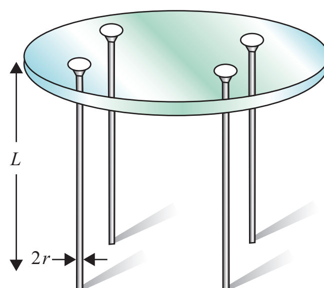


图 6.5 有着细长圆柱形桌腿的轻质桌子
（轻质和细长是两个独立的目标，需满足承载不失稳的设计要求。最佳材料为 $\frac{E^{1/2}}{\rho}$ 和 E 值最大的材料。）

1. 解读

这是一个双目标设计问题，即质量最小化和细长比最大化。此外，包含一个约束：抗失稳。首先，我们来考虑质量最小化的目标。

表 6.5 桌腿的设计需求

功能	柱(承受压力)
约束条件	规定的长度 L
	在设计载荷条件下不能发生屈曲
	偶尔撞击时不能断裂
目标	质量最小化
	长径比最大化
自由变量	桌腿的直径 $2r$
	材料的选择

桌腿是一根细长柱，长度 L 以及所能承受的最大载荷 F 两个量是给定的。桌腿的半径 r 是自由变量。若要桌腿的质量 m 最小，目标函数如下：

$$m=\pi r^2 L\rho \tag{6.6}$$

式中，ρ 是材料密度。此外，桌腿必须满足一个前提条件，即承受载荷 F 而不失稳，长度为 L 半径为 r 的桌腿的弹性失稳载荷 F_{crit}（见附录 B）为：

$$F_{\mathrm{crit}}=\frac{\pi^2 EI}{L^2}=\frac{\pi^3 Er^4}{4L^2} \tag{6.7}$$

式中，E 是弹性模量。圆柱截面的惯性矩 $I=\pi r^4/4$，实际承受载荷不能超过 F_{crit}。由式（6.7）得到自由变量 r 的表达式，代入式（6.6），得到：

$$m\geqslant\left(\frac{4F}{\pi}\right)^{1/2}(L)^2\frac{\rho}{E^{1/2}} \tag{6.8}$$

所有与材料性能有关的变量都在最后一个括号中。因此，质量最小化问题转化为选择材料指标 M_1 值最大的材料。

$$M_1=\frac{E^{1/2}}{\rho}$$

(附录 C 给出了不同设计要求对应的材料指标)

接下来讨论桌腿的细长比目标。变换式（6.7），令 F_{crit} 等于 F，得到承受力 F 情况下桌腿不失稳的条件：

$$r\geqslant\left(\frac{4F}{\pi^3}\right)^{1/4}L^{1/2}\left(\frac{1}{E}\right)^{1/4} \tag{6.9}$$

由此，桌腿细长比最大的材料，其材料指标 M_2 值应最大：

$$M_2=E$$

2. 选择

如何寻找 $E^{1/2}/\rho$ 和 E 值较大的材料，我们又需要用到如图 6.6 所示的弹性模量 E 与密度 ρ 的关系图。从图上可以看出，对应材料指标 $E^{1/2}/\rho$ 的选择基准线是一组斜率为 2 的直线。将基准线向上平移，直至只剩下小部分材料位于该线之上。此时对应的 $M_1=5\mathrm{GPa}^{1/2}/(\mathrm{Mg/m^3})$，位于该线之上的材料有着较大的 M_1 值。这些材料分别是木材(桌腿的传统材料)、复合材料（尤其是 CFRP） 和某些工程陶瓷材料。聚合物由于刚度不够，未包含在内。此外，金属由于太重也被排除（即便是最轻的镁合金，也不符合要求)。

进一步缩小选择范围：为满足细长比的设计要求，E 必须足够大。图中处于同一

图 6.6 轻质细长桌腿材料的选择（木材是个不错的选择，像 CFRP 这类复合材料也不错，而且有着更大的弹性模量，能满足轻量化和细长比最大化的要求。陶瓷满足设计要求，但是易碎。）

水平线的材料有着相同的 E 值，水平线越往上的材料刚度越好。在图 6.6 中，将水平线放置于 $M_2 = 100\text{GPa}$ 的位置，可以将木材和 GFRP 排除。如果要求桌腿尽量细长，那么候选名单就只剩下 CFRP 和陶瓷了。在相同重量下，CFRP 桌腿和陶瓷桌腿只有木质桌腿的一半粗。众所周知，陶瓷易碎，其断裂韧度值较低。桌腿经常会受到磕磕碰碰，因此常识告诉我们需要增加一个约束条件，即足够的韧度。借助图 4.7 的断裂韧度与弹性模量的关系图可知，只有 CFRP 符合所有要求。CFRP 的高成本可能会让 Snr. Tavolino 重新考虑他的设计，但那是另外一回事了，毕竟在最初的设计中并没有提到成本问题。

以表 6.6 所示的形式将候选材料罗列出来是非常有帮助的，不仅给出了最佳材料，同时也列出了次好的材料。一旦有其他因素需要考虑的时候，或许次好的材料就会变成最佳材料。

3. 附言

读者可能会说，管状桌腿比实心圆柱桌腿要轻。确实如此，但是管状桌腿同时带来的问题是更为粗大。这就取决于 Snr. Tavolino 在轻量化和细长比这两个设计目标中更看重哪一个了，需由他来决定。如果他能够接受粗大的桌腿，管状桌腿也是可以考虑的，并且材料的选择可能会有所不同。当截面形状作为一个材料选择的变量时，情况

会大不相同，这将在第 9 章中详细讲解。

表 6.6 桌腿材料的选择

材料	典型的 M_1 /(GPa$^{1/2}$ · m^3/Mg)	典型的 M_2 /GPa	备注
GFRP	2.5	20	比 CFRP 便宜，但是 M_1 和 M_2 较低
木材	4.5	10	M_1 值较高，M_2 值较低，便宜、传统且可靠
陶瓷	6.3	300	M_1 和 M_2 值较高，但是较脆，因此排除
CFRP	6.6	100	M_1 和 M_2 值较高，但是贵

由于断裂韧度值较低，陶瓷桌腿被排除在外。如果设计目标是一个在高温下使用的轻质细长桌腿（似乎不太可能），陶瓷材料或许是一个选项。如果能使桌腿免于磕磕碰碰或者给桌腿施以预挤压力，或许易碎的问题也可以避免。

相关案例：

见"船桨材料"（见 6.2 节）、"大型望远镜的反光镜"（见 6.3 节）、"冲突目标：桌腿"（见 8.5 节）、"人力飞机翼梁"（见 10.2 节）、"竞赛用自行车前叉"（见 10.3 节）、"再论桌腿：细和轻哪个更重要？"（见 10.5 节）。

6.5 建筑用结构材料

大多数人这辈子买的最贵的东西莫过于房子了。大体来说，建一所房子一半的花销是在建筑材料上。这些建筑材料的用量非常大。对于普通家庭住房，大约 200t；对于大型公寓，大约 20000t。这些材料主要有三种功能：建筑物支撑结构；与外界隔离的外墙；内部隔热隔音，用于装饰的内墙。

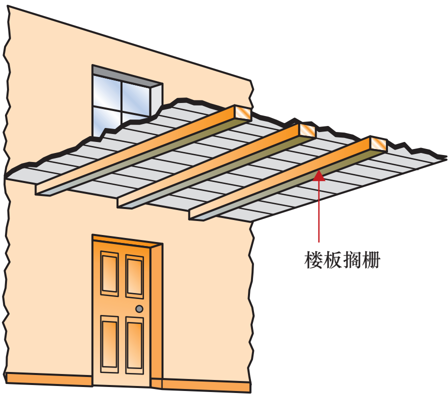


图 6.7 建筑材料大多分为三种功能：框架给予力学支撑；外墙隔绝外部环境；内墙控制光、热和声（选择标准取决于功能要求。）

结构材料必须刚性好、强度高且成本低。刚性好，建筑物在风吹雨打和内力作用下不会发生太大变形；强度高，则不用担心房屋倒塌。之所以要成本低，则是因为材料用量非常大。建筑物的结构框架很少暴露在环境中，一般说来也看不见，因此耐蚀性和外观性并不重要。

设计要求很简单：满足刚度和强度要求，成本最小化。更明确一点的话，为楼板搁栅选择合适的材料。表 6.7 总结了相应的设计要求。

1. 解读

楼板搁栅是梁结构，承受弯曲载荷。轻质刚性梁的材料指标在第五章已经给出（式(5.11)～式(5.15)）。成本 C 则为材料的质量 m 乘以每千克的单价 C_m：

$$C = m \times C_m = AL\rho C_m \qquad (6.10)$$

表 6.7　楼板搁栅的设计需求

功能	承受楼板的梁
约束条件	长度 L 指定
	刚度:在不超过设计承重的情况下不会大变形
	强度:在不超过设计承重的情况下不会失效
目标	成本最低 C
自由变量	梁的截面积 A
	材料的选择

上式即为该问题的目标函数。参照第 5 章的步骤，可得到最小成本刚性梁的材料指标为：

$$M_1 = \frac{E^{1/2}}{\rho C_m}$$

该材料指标用于刚度约束。现在我们将约束条件改为强度，目标函数依然为式(6.10)。此外，梁必须能承受载荷 F 而不失效。根据附录 B.4 可知，梁的失效载荷为：

$$F_f = C_2 \frac{I\sigma_f}{\gamma_m L} \tag{6.11}$$

式中，C_2 是常数；σ_f 是材料的破坏应力；γ_m 是外部边缘到中性轴的距离。此处我们以一个矩形截面梁为例，高度为 d，宽度为 b。假设梁的尺寸比例是固定的，即 $d=\alpha b$，其中 α 是高宽比。对于木梁，该值通常取 2。将上述关系和 $I=bd^3/12$ 代入式(6.10)消去变量 A，可得到承受载荷 F_f 的梁的成本表达式：

$$C = \left(\frac{6\sqrt{\alpha}}{C_2}\frac{F_f}{L^2}\right)^{2/3} L^3 \frac{\rho C_m}{\sigma_f^{\ 2/3}} \tag{6.12}$$

要使得成本最小，所选择材料对应的指标 M_2 值应最大。

$$M_2 = \frac{\sigma_f^{\ 2/3}}{\rho C_m}$$

2. 选择

首先考虑刚度约束。图 6.8a 给出了弹性模量 E 与单位体积相对成本 $C_m\rho$ 的关系。图中采用相对成本 C_R（定义见第 4 章）代替总成本 C_m，对于材料选择的结果不产生影响。阴影带的斜率与 M_1 近似相等，所覆盖的材料分别是混凝土、岩石、砖块、木材、铸铁和碳钢。图 6.8b 为强度与单位体积相对成本的关系图。阴影带——这次对应的为 M_2——给出了基本上相同的选择。所得结果见表 6.8。这些材料确实是曾经的建筑材料，如今也广为使用。

表 6.8　建筑结构材料的选择

材料	M_1 /[GPa$^{1/2}$/(kg · m^{-3})]	M_2 /[MPa$^{2/3}$/(kg · m^{-3})]	备注
混凝土	160	14	仅能受压
砖	12	12	
石	9.3	12	
木	21	90	可以承受弯曲和拉伸,也可以压缩,形状可以自由选择
铸铁	17	90	
钢	14	45	

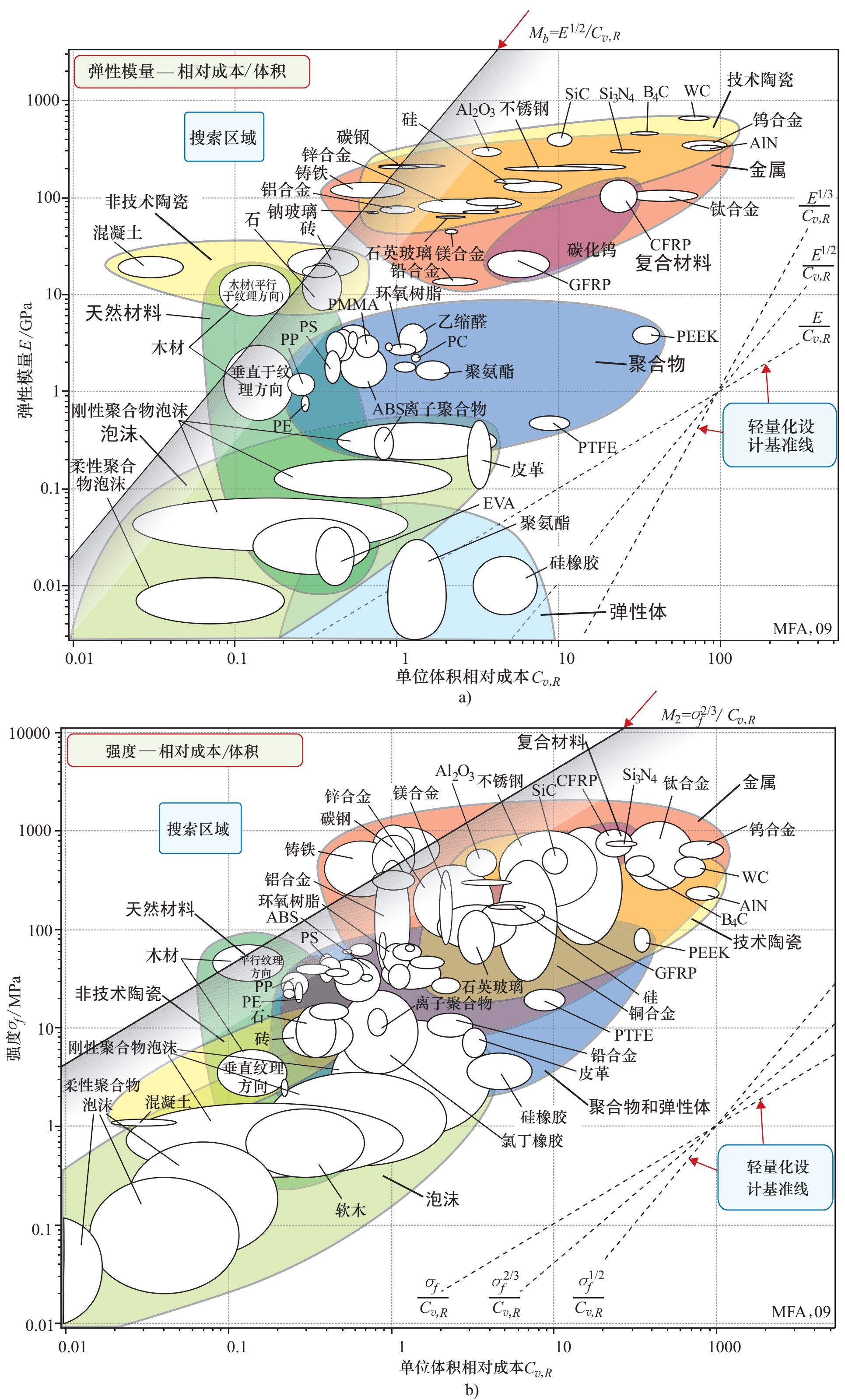


图 6.8 建筑结构框架材料的选择

a）目标：价廉且刚性好 b）目标：价廉且强度高

3. 附言

混凝土、岩石和砖块只有在承压时才具有较高的强度，所以在实际应用中一般使其承压（如柱和拱形结构）。木材、钢铁和强化混凝土不仅能承受压力，同时能承受弯矩和拉力。此外，钢铁还能做成各种形状（工字形、方形和管形，这将在第 9 章进行讨论）。以这些材料建成的建筑物，风格更为形式多样。

跨入 21 世纪，很多循规蹈矩的建筑师被建议使用碳纤维（CFRP）和玻璃纤维（GFRP）增强复合材料、铝合金、钛合金和不锈钢等材料来设计建筑物。一些建筑师确实进行了尝试，但是上述两个图表无疑给了他们当头一棒。为得到相同的刚度和强度，其成本将增至 5 倍，甚至是 50 倍。民用建筑如楼房、桥梁和道路等，属于材料密集型建筑，材料成本占总成本的主要部分，且用量巨大。因此，只有成本最低的材料才适用，设计时需考虑这些材料的适用性。

相关阅读：

Redgrave，S.（1992）. *Complete book of rowing* Partridge Press.

相关案例：

见“大型望远镜的反光镜”（见 6.3 节）、“桌腿材料”（见 6.4 节）、“人力飞机翼梁”（见 10.2 节）、“竞赛用自行车前叉”（见 10.3 节）。

6.6 飞轮材料

飞轮是用来储存能量的。小型飞轮的材料为铅，常见于小孩子的玩具。老式蒸汽机和现代汽车也有飞轮结构，但是它们由铸铁构成。在一些车辆的储能和新型制动系统中也有飞轮，这些飞轮有的采用高强钢制成，有的采用复合材料制成。从材料种类来看，铅、铸铁、钢以及复合材料都能用作飞轮。那么，飞轮的最佳材料是什么呢？

高效的飞轮要求单位质量储存尽可能多的能量。当飞轮旋转时，角速度 ω 越大，储存的能量越多。但是角速度越大，离心力就越大，一旦超过飞轮材料的抗拉强度，飞轮就会断裂。所以，抗拉强度限定了飞轮储能的上限。

从这个角度来讲，小孩子玩具里的飞轮的效率极低，因为玩具飞轮的角速度是由小孩子的拉力决定的，远远没有达到会使飞轮断裂的角速度。对于本节所涉及的案例以及汽车发动机中的飞轮，我们希望飞轮在给定角速度情况下，能储存尽可能多的能量。飞轮盘的外半径 R 由飞轮腔室的尺寸决定。

因此，飞轮设计的目标和约束取决于其用途。表 6.9a 和表 6.9b 给出了两种不同的设计要求。

表 6.9a 高性能储能飞轮的设计需求

功能	飞轮用于储能
约束条件	外径 R 固定
	不能失效
	足够的韧度，防止断裂
目标	单位质量储存动能最大化
自由变量	材料的选择

表 6.9b 定速飞轮的设计需求

功能	孩子玩具用飞轮
约束条件	外径 R 固定
设计目标	定角速度下单位体积储存动能量大化
自由变量	材料的选择

1. 解读

对于第一种类型的飞轮，单位质量的储能应尽可能多，且不能失效。将该飞轮简化为如图 6.9 所示的一个半径为 R，厚度为 t 的实心圆盘，以角速度 ω 旋转。根据附录 B，飞轮的储能 U 为：

$$U=\frac{1}{2}J\omega^2 \tag{6.13}$$

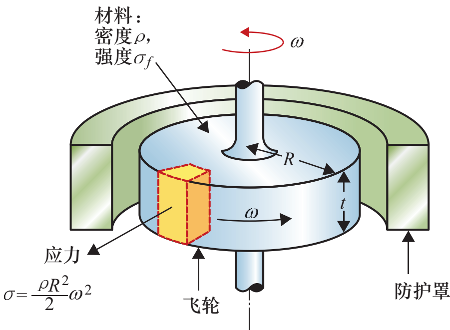


图 6.9 飞轮：抗拉强度限制了飞轮能存储的最大动能

式中，$J=\frac{\pi}{2}\rho R^4 t$ 是圆盘的极惯性矩；ρ 是飞轮材料的密度。由此可得到：

$$U=\frac{\pi}{4}\rho R^4 t\omega^2 \tag{6.14}$$

圆盘的质量为：

$$m=\pi R^2 t\rho \tag{6.15}$$

要使单位质量的动能最大，即上述两式的比值最大：

$$\frac{U}{m}=\frac{1}{4}R^2\omega^2 \tag{6.16}$$

飞轮在旋转时，随着储能的增大，飞轮所受离心力也随之增大。根据附录 B，均匀厚度的旋转圆盘的最大主应力为：

$$\sigma_{max}=\left(\frac{3+\nu}{8}\right)\rho R^2\omega^2\approx\frac{1}{2}\rho R^2\omega^2 \tag{6.17}$$

式中，ν 是泊松比$\left(\nu\approx\frac{1}{3}\right)$。最大主应力不能超过材料的破坏应力 σ_f（此处省略安全系数），这就给定了飞轮角速度 ω 和圆盘半径 R（自由变量）乘积的上限值。将式(6.16)和式(6.17)中的 $R\omega$ 消除可得到：

$$\frac{U}{m}=\frac{1}{2}\left(\frac{\sigma_f}{\rho}\right) \tag{6.18}$$

高性能飞轮的最佳材料是对应材料指标 M 值（单位：kJ/kg）较大的材料：

$$M=\frac{\sigma_f}{\rho} \tag{6.19}$$

现在来讨论第二种类型的飞轮，即小孩子玩具中的飞轮。对于这种情况，我们要求飞轮在固定角速度 ω 下，单位体积 V 存储的能量最多。由式（6.16）可知，单位体积储存的能量为：

$$\frac{U}{V}=\frac{1}{4}\rho R^2\omega^2$$

R 和 ω 是给定值，所以最佳材料为 M_2 值最大的材料。

$$M_2=\rho \tag{6.20}$$

2. 选择

图 6.10 所示为强度 σ_f 与密度 ρ 的关系图，材料指标 M_1 对应一系列斜率为 1 的直线。图中给出了一条 $M_1=200\text{kJ/kg}$ 时的选择基准线。有着较大 M_1 值的候选材料落在区域 1，位于图的左上方。最佳材料有点出乎意料，包含 CFRP 复合材料、高强度钛合金和一些陶瓷材料。不过，陶瓷材料因其断裂韧度较差而被排除在外。

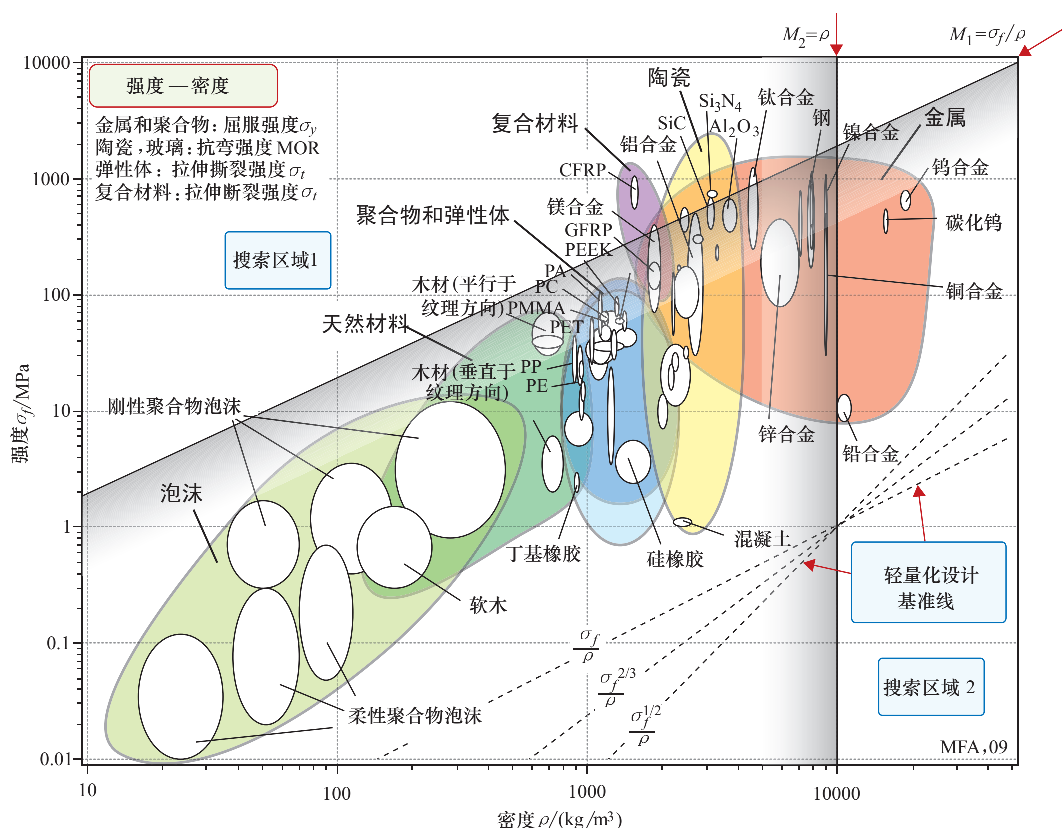


图 6.10 飞轮材料的选择（最佳选择是复合材料，当约束条件是角速度而非强度时，铅和铸铁作为传统的飞轮材料也是个不错的选择。）

那么，小孩玩具里的铅飞轮究竟是怎么回事呢？几乎没有比 CFRP 和铅差距更大的材料了。前者强度高且质量轻，后者软且重。为何最终的选择是铅呢？因为针对小孩玩具的设计约束条件是不同的。即使力气最大的小孩都不可能使其飞轮玩具达到飞轮断裂所需的角速度。角速度的大小由驱动机制（例如拉线和摩擦驱动）所决定。因此，密度最大的材料才是最合适的。图 6.10 中还有一根选择基准线对应 M_2 值为 10000kg/m^3。位于该线右侧的区域 2 是候选材料区。由图可知，铅是一个不错的选择。钨更好，但是太贵；铸铁不是很好，但是便宜；金、铂和铀（图中未显示）是最好的材料，但是由于其他原因不适合作为飞轮材料。

3. 附言

一个 CFRP 转子的储能能力大约在 400kJ/kg。相比之下，一个铅飞轮只能储能 1kJ/kg，铸铁飞轮大约为 30kJ/kg。相比于汽油的能量密度，这些飞轮的储能能力简直是小巫见大巫，汽油的能量密度接近 20000kJ/kg。即便如此，飞轮中储存的能量密度也是相当可观的，因此如果因为失效造成能量的突然释放，后果不堪设想。飞轮圆盘周围必须要有防护罩，并且在制造过程中必须有精确的质量控制，以避免不平衡力。大量的聚合物储能飞轮已经用于货车和巴士中，在风力发电机的储能机构中也有应用。

现在讲一个题外话：电动汽车。如今混合动力汽车已经广泛推广，使用高级蓄电池技术来储能。但是，蓄电池有其局限性。见表 6.10，蓄电池的能量密度低，因此对汽车的体型和性能产生了很大限制。切实可行的一种想法是：设计一种飞轮，使它与最好的电池有着相同的能量密度。

表 6.10 能源的能量密度

能源	能量密度 kJ/kg	备注
汽油	20000	烃类氧化-不包含氧的质量
火箭燃料	5000	比烃类氧化少，因为氧化剂也是能源的组成部分
飞轮	≤400	有潜力，但是尚未被证实
锂离子电池	≤350	昂贵，寿命有限
镍镉电池	170～200	相对锂离子电池便宜
铅酸电池	50～80	超过了能接受的重量范围
弹簧，橡皮圈	≤5	相比飞轮储能较低

现在，考虑一下电动汽车的飞轮设计。一对反向旋转的 CFRP 圆盘固定在钢制飞轮防护罩里，内嵌在圆盘里的磁铁在经过线圈时产生电流，从而向电动机供电以驱动车轮。据估计，这种飞轮可以使得电动车与汽油发动机相比，有足够的价格优势，而且对环境是无害的。

相关阅读：

Christensen, R. M. (1979). *Mechanics of composite materials* (p.213 et seq). Wiley Interscience. Lewis, G. (1990). *Selection of engineening materials* (Part 1, p, 1). Prentice-Hall.

Medlicott, P.A.C, & Potter, K.D. (1986). The development of a composite flywheel for vehicle applications, In K. Brunsch, H-D. Golden, & C-M. Horkert (Eds.), *High Tech—the way into the nineties* (p.29). Elsevier.

相关案例：

见“弹簧材料”（见 6.7 节）、“安全压力容器”（见 6.11 节）、“多约束：高性能发动机连杆”（见 8.3 节）。

6.7 弹簧材料

如图 6.11 所示，弹簧形状各异且用途广泛，有拉伸弹簧（如橡皮筋）、片弹簧、盘簧、螺旋弹簧和扭力杆。无论弹簧的形状如何、用于何处，要获得最小体积的弹簧，最佳材料是对应 σ_f^2/E 值最大的材料；要获得质量最小的弹簧，最佳材料是对应 $\sigma_f^2/\rho E$ 值最大的材料（可由式（6.21）推导所得）。表 6.11 给出了弹簧的设计要求。在为弹

簧选择最佳材料的同时，正好向大家介绍两个最有用的图——弹性模量 E 与强度 σ_f 关系图，比模量 E/ρ 与比强度 σ_f/ρ 关系图。

表 6.11 弹簧的设计需求

功能	储存弹性势能
约束条件	不会失效，弹簧的 $\sigma<\sigma_f$ 应力小于破坏应力
目标	单位体积或重量的储能是大
自由变量	材料的选择

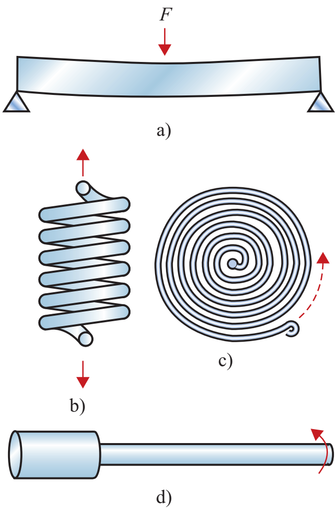


图 6.11 弹簧用于储能（不论什么形状，受哪种载荷，最佳材料都是对应 σ_f^2/E 值或 $\sigma_f^2/\rho E$ 值最大的材料。）

1. 解读

弹簧的主要功能是储存弹性势能，并在必要时释放能量。弹簧承载应力为 σ 时，单位体积储存的弹性势能为：

$$W_v = \frac{1}{2}\frac{\sigma^2}{E} \tag{6.21}$$

式中，E 是弹性模量。我们希望 W_v 越大越好，但是当所受应力 σ 超过材料的屈服强度或破坏应力 σ_f 时，弹簧就会失效，因此约束条件为 $\sigma<\sigma_f$。由此，能量密度的极值为：

$$W_v = \frac{1}{2}\frac{\sigma_f^2}{E} \tag{6.22}$$

扭力杆和片弹簧不如轴向弹簧有效，因为前者很多材料并没有满载。举例来说，中性轴处的材料完全没受力。对于片弹簧，极限能量密度为：

$$W_v = \frac{1}{4}\frac{\sigma_f^2}{E}$$

对于扭力杆，极限能量密度为：

$$W_v = \frac{1}{3}\frac{\sigma_f^2}{E}$$

由此可见，上述区别对弹簧材料的选择并没有影响。不论什么形状，弹簧的最佳材料都是对应 M_1 值最大的材料：

$$M_1 = \frac{\sigma_f^{\ 2}}{E} \tag{6.23}$$

如果更看重质量而不是体积，材料指标要除以密度 ρ（单位质量储能量）。此时，最好的材料就是对应 M_2 值最大的材料：

$$M_2 = \frac{\sigma_f^{\ 2}}{\rho E} \tag{6.24}$$

2. 选择

图 6.12a 可用于最小体积弹簧的材料选择。材料指标 $M_1=\sigma_f^{\ 2}/E$ 对应一系列斜率为 2 的直线。M_1 值较大的材料位于图表的右下角。图中深色线对应的 M_1 值为 2.5MJ/m³，借助该基准线我们很容易找到候选材料。最佳材料是靠近直线顶部的高强钢，也可以



图 6.12 材料的强度-弹性模量与比强度-比模量的关系图

a）对于小型弹簧材料的选择（高强钢是最好的材料，在一定条件下，玻璃、CFRP 和 GFRP 都能做成优质弹簧。弹性体也很好，陶瓷材料由于抗拉强度低而被排除在外。）

b）轻质弹簧材料的（选择复合材料和木材都是不错的选择，弹性体非常好，金属由于密度大，不适合。）

考虑一些其他材料，如 CFRP（现在用于车架弹簧）、钛合金（性能好但价格高）和尼龙（小孩玩具里经常采用），当然还有弹性体。注意，上述步骤从几乎每一类材料中都选出了候选材料，包括金属、聚合物、弹性体和复合材料。表 6.12a 列出了这些材料，并且加了备注说明。

表 6.12a 小型弹簧的材料

材料	$M_1=(\sigma_f^2/E)/(\mathrm{MJ/m^3})$	备注
钛合金	4~12	昂贵，耐腐蚀
CFRP	6~10	性能与钢铁相似；昂贵
弹簧钢	3~7	传统的选择：易成形和热处理
尼龙	1.5~2.5	便宜，易成形，但是易损耗
橡胶	20~50	比弹簧钢好，但是易损耗

表 6.12b 轻质弹簧的材料

材料	$M_1=(\sigma_f^2/\rho E)/(\mathrm{kJ/kg})$	备注
钛合金	0.9~2.6	比钢铁好；耐腐蚀；昂贵
CFRP	3.9~6.5	比钢铁好；昂贵
CFRP	1.0~1.8	比弹簧钢好，比 CFRP 昂贵
弹簧钢	0.4~0.9	因密度较高，不是很好的选择
木材	0.3~0.7	从质量角度考虑，木材可制成好弹簧
尼龙	1.3~2.1	和钢一样好，但是易磨损
橡胶	18~45	性能卓越，是弹簧钢的 20 倍，但是易磨损

轻质弹簧的材料选择基于图 6.12b 来进行。材料指标 M_2 对应斜率为 2 的一系列直线：

$$M_2=\left(\frac{\sigma_f{}^2}{\rho}\right)^2\bigg/\left(\frac{E}{\rho}\right)=\frac{\sigma_f{}^2}{E\rho} \tag{6.25}$$

图 6.12b 中给出了一条对应 $M_2=1\mathrm{kJ/kg}$ 的直线。由于金属的密度较高，其表现不如复合材料，更不如弹性体（单位质量的橡皮圈储存的弹性势能是最好的弹簧钢的 8 倍）。表 6.12b 列出了相应的候选材料。作为弓的传统材料，木材也被列于表中。

3. 附言

选择弹簧材料时有很多额外的因素不可忽略，比如车辆悬架弹簧必须抗疲劳耐腐蚀；发动机气门必须能够适应高温环境。另外，一个敏感的特性是损耗系数（见图 4.9）。在振动时，聚合物损耗系数高，能量损失严重。相对而言，硬化后的金属则不会。考虑到蠕变效应，聚合物不适用于长期稳态受载的情况，只适用于像挂钩和定位弹簧这类间歇受载的情况。

相关阅读：

Boiton, R. G. (1963). The mechanics of instrumentation. *Proc. I. Mech. E.*, 177 (10), 269-288.

Hayes, M. (1990). Materials update 2: springs, *Engineering*, May, p. 42.

相关案例：

见“弹性铰链和联轴器”（见 6.8 节）、“弹性结构：叶片式还是链式”（见 10.7 节）、“超高效弹簧”（见 10.8 节）、“握力不会减小的连接器”（见 12.7 节）。

6.8 弹性铰链和联轴器

自然界存在着很多弹性铰链，或者说自然铰链（见图 6.13）。皮肤、肌肉和软骨组织都能承受可恢复的变形。同样，人体结构中含有各种屈曲和扭转铰链，比如韧带。它能用于链接身体的不同部分，传递相互之间的作用力，并允许不同部分之间发生一定量的弹性错位。表 6.13 给出了弹性铰链的设计要求。那么，哪些材料适合于做铰链呢？

表 6.13 弹性铰链的设计需求

功能	弹性铰链
约束条件	不会失效，铰链上 $\sigma<\sigma_f$
目标	弹性挠度最大化
自由变量	材料的选择

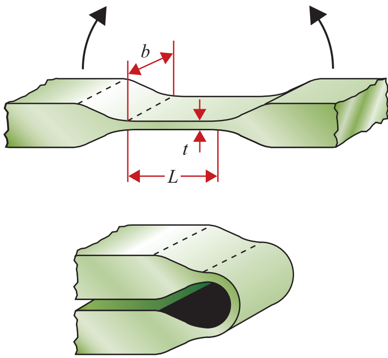


图 6.13 弹性或“自然”铰链，经重复弯曲不发生失效（洗发水瓶盖是一个典型的弹性铰链，在高性能器械中也会发现很多弹性铰链的应用。）

1. 解读

以用于盒盖的铰链为例。将盒子、盖子和铰链看作独立的单元。铰链作为薄韧带，当盒子关闭时发生弹性弯曲，但不承受轴向力。因此，最好的材料必须具有最小的弹性弯曲半径。如果厚度为 t 的铰链发生弹性弯曲，弯曲半径为 R，那么表面应变为：

$$\varepsilon=\frac{t}{2R} \tag{6.26}$$

由于铰链是弹性的，因此最大应力为：

$$\sigma=E\,\frac{t}{2R} \tag{6.27}$$

该应力绝不能超过屈服或破坏应力 σ_f，因此在铰链不失效的情况下，其最小弯曲半径为：

$$R\geqslant\frac{t}{2}\left(\frac{E}{\sigma_f}\right) \tag{6.28}$$

最佳材料是对应 R 值最小的材料，即材料指标 M 值最大：

$$M=\frac{\sigma_f}{E} \tag{6.29}$$

2. 选择

材料的选择可以借助弹性模量 E 与强度 σ_f 的关系图（见图 6.14）来完成。依据斜率为 1 的选择基准线，我们可以得到相应的候选材料。图中我们给出了对应 $M=\frac{\sigma_f}{E}=2\times10^{-2}$的选择基准线。铰链的最佳材料位于这根线的右侧，基本上都是聚合物材料。表 6.14 给出了材料清单，包括聚乙烯、聚丙烯、尼龙和弹性体，虽然这些材料对于盒子本身来说可能弹性过大。价廉的产品一般采用由聚乙烯、聚丙烯或者尼龙材料制成的弹性铰链。弹簧钢以及其他金属弹簧材料（如磷青铜）都可作为备选材料。它们不仅具有可接受的$\frac{\sigma_f}{E}$值，同时具有较大的 E 值，能提供一定弹性的同时还能保持结构位置

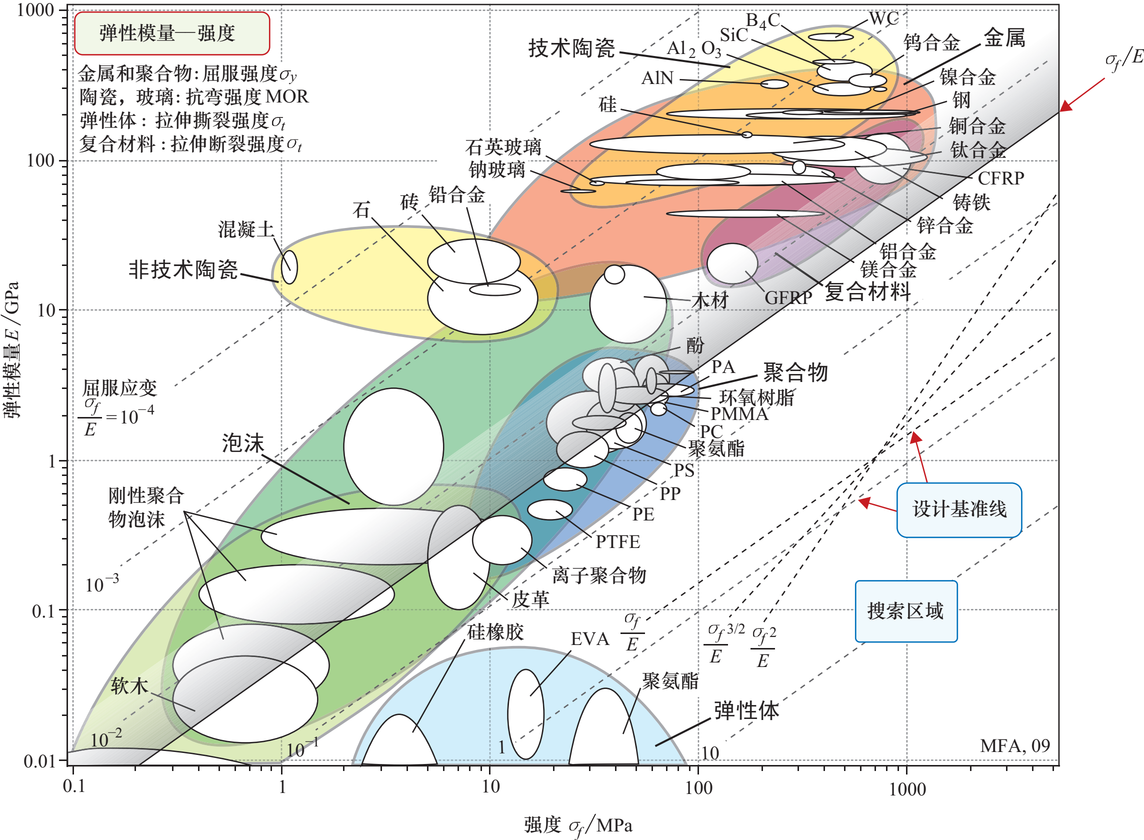


图 6.14 弹性铰链材料的选择（弹性体是最好的，但可能刚度不够，无法满足其他设计要求；诸如尼龙、PTFE、PE 之类的聚合物更好；弹簧钢不是很好，但强度足够。）

稳定性（如悬浮继电器）。表 6.14 中给出了更为详细的信息。

3. 附言

聚合物在设计上比金属有更大的自由度。弹性铰链就是这样一个鲜明的例子。将盒子、铰链和盖子三个零件连接时，需要用到紧固件。可以将它们看作一个盒-链-盖单元，一次成型。聚合物的类弹簧性质可使其很容易地连接在一起。另一个例子是弹性体联轴器，它是一种灵活的通用连接件，允许大角度、平行和轴向变形，同时具有减振作用。弹性体铰链拥有很多在工程设计中可以利用的优良性能。

表 6.14 弹性铰链的材料

材料	$M(\times10^{-3})$	备注
聚乙烯	32	广泛用于廉价瓶盖
聚丙烯	30	比聚乙烯刚性好，易成形
尼龙	30	比聚乙烯刚性好，易成形
聚四氟乙烯	35	非常耐用，相比 PE，PP 等更昂贵
弹性体	100～1000	性能卓越，但是弹性模量很低
高强铜合金	4	M 值比聚合物低，常用于高拉伸刚度的情况
弹簧钢	6	

相关案例：

见“弹簧材料”（见 6.7 节）、“填料材料”（见 6.9 节）、“脆性聚合物的极限变形量设计”（见 6.10 节）、“弯曲形状：片式和股式”（见 10.7 节）。

6.9 弹性填料材料

可再用的弹性填料一般呈圆柱形，置于两平板间承压（见图 6.15）。弹性填料必须形成尽可能大的接触宽度 b，同时保证接触应力 σ 足够低，防止损坏上下平板。填料本身也须保持弹性以便重复使用。那么，什么材料才是好的填料呢？弹性体是不二之选。为谨慎起见，我们依据表 6.15 中的设计要求来做一下材料选择。

表 6.15 弹性填料的设计需求

功能	弹性填料
约束条件	接触压力限制
	成本低
目标	表面一致性最大
自由变量	材料的选择

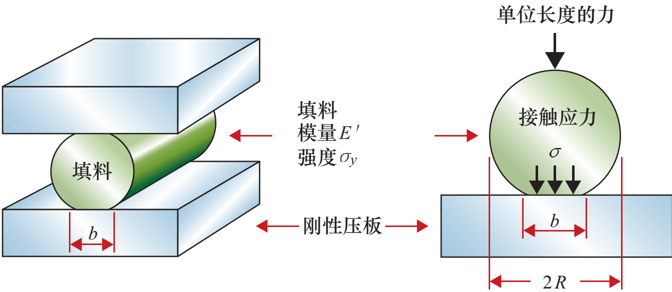


图 6.15 弹性填料（性能优良的填料能保证均匀接触，不会对自身及与之相接触的平板造成损伤。）

1. 解读

一个直径为 $2R$、弹性模量为 E 的圆柱体，置于一块刚性平板上用力压紧。单位长度上的力为 f，可形成宽度为 b 的弹性接触面。依据附录 B 可知：

$$b \approx 2.3\left(\frac{fR}{E}\right)^{1/2} \tag{6.30}$$

这就是需要最大化的量，即设计目标。依据附录 A，填料和平板上的接触应力可近似为：

$$\sigma = 0.57\left(\frac{fE}{R}\right)^{1/2} \tag{6.31}$$

约束条件：填料必须保持弹性，即 σ 不能超过其屈服强度或破坏应力 σ_f。结合上述两式，可得到：

$$b \leqslant 4.0R\left(\frac{\sigma_f}{E}\right) \tag{6.32}$$

材料指标 M_1 最大，则接触宽度最大：

$$M_1 = \frac{\sigma_f}{E}$$

与此同时，接触应力 σ 必须足够低，以避免对平面造成损伤。本例为给出最大的接触宽度，将最大接触应力取为 σ_f，即填料材料的破坏应力。假设接触应力超过 100MPa 时，平板将损坏。那么，接触应力需低于该值。

$$M_2 = \sigma_f \leqslant 100\text{MPa}$$

2. 选择

图 6.16 所示的弹性模量 E 与强度 σ_f 的关系图中给出了这两项材料指标，从而选出了弹性体、泡沫和软木塞三类材料。表 6.16 给出了相关候选材料并做了说明。材料

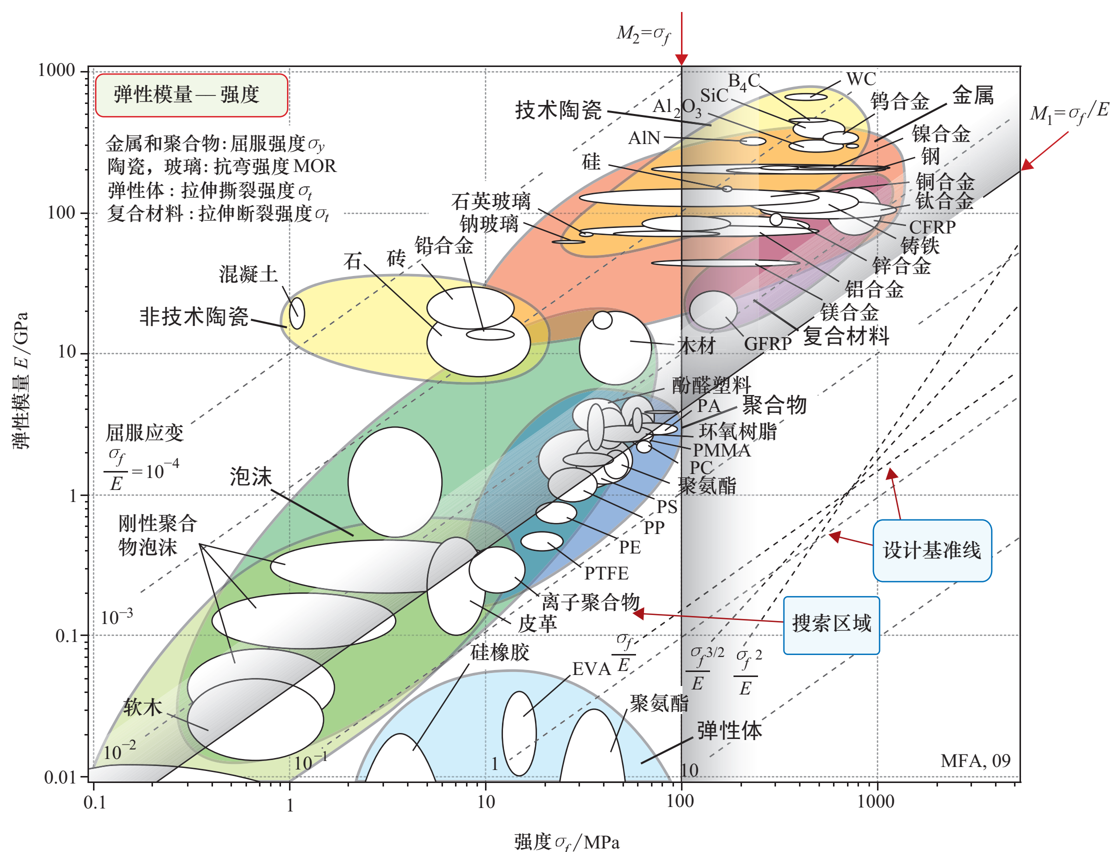


图 6.16　弹性填料材料的选择（弹性体、柔性聚合物和泡沫是弹性填料的候选材料。）

指标 $M_2=100\text{MPa}$ 将所有种类的弹性体都列为候选材料。如果将 M_2 值降至 10MPa，除了最柔软的弹性体被排除外，其余材料依然符合要求。此时，发泡聚合物为最佳材料。

表 6.16　弹性填料材料的选择

材料	$M_1=\frac{\sigma_f}{E}$	备注
弹性 EVA	0.7~1	天然选择，耐热性差，不耐融
聚氨酯	2~5	广泛用作填料
硅酮橡胶	0.2~0.5	相比碳链弹性体，有更高的耐热性和耐化学腐蚀性
PTFE	0.05~0.1	昂贵，化学性质稳定，耐热性好
聚乙烯	0.02~0.05	便宜，常用于永久固定
聚丙烯	0.02~0.04	便宜，常用于永久固定
尼龙	0.02~0.03	接触压力接近上限
软木塞	0.03~0.06	接触压力较低，化学性质稳定
聚合物泡沫	≤0.03	接触压力非常低，易损坏

3. 附言

上述分析强调了填料的功能需求，即接触面积要大，接触应力要小，环境稳定性要强。弹性体能使接触面积最大；泡沫和软木塞能够使接触应力最小；PTFE 和硅胶是耐热和有机溶剂的最佳材料。因此，最终材料的选择取决于填料的应用环境。

相关案例：

见“弹簧材料”（见 6.7 节）、“弹性铰链和联轴器”（见 6.8 节）。

6.10 脆性聚合物的极限变形量设计

材料抵抗裂纹扩展的能力可由平面应变断裂韧度 K_{IC} 来衡量。在机械工程师心里有一条不成文的规则，即 $K_{IC}<15\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 的材料不予考虑。几乎所有的金属材料都满足这个要求，它们的 K_{IC} 值在 $20\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 到 $100\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 之间。白口铸铁和一些粉末冶金产品则不符合这个要求，其 K_{IC} 值只有 $10\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$。普通工程陶瓷材料的 K_{IC} 值在 $1\sim6\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 的范围内，因此机械工程师对于这类材料的应用非常谨慎。工程聚合物的断裂韧度更差，其 K_{IC} 值的范围在 $0.5\sim3\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$。然而，工程师们却热衷于使用这类材料。这是什么原因呢？

脆性材料的变形一直处于弹性变形直至断裂。断裂时，对应的应力值为：

$$\sigma_f=\frac{CK_c}{\sqrt{\pi a_c}} \tag{6.33}$$

式中，K_c 是断裂韧度的近似值；a_c 是材料内部最大裂纹的长度；C 是由几何形状决定的常数，近似等于 1。对于极限承载设计，例如桥梁的受拉杆件，如果应力超过式（6.33）得出的应力值，相应部分就会发生脆性断裂。所以，我们希望材料的 K_c 值越大越好。

但是并不是所有的设计都是极限承载设计，有一些是极限能量设计，还有一些是极限变形量设计。不同的设计形成的选择标准也不尽相同。接下来我们讨论下表 6.17 所列三种不同约束条件下的设计。

表 6.17 设计需求

功能	预防脆性断裂
约束条件	指定的设计载荷
	指定的设计能量
	指定的设计挠度
目标	体积最小化(质量、成本)
自由变量	材料的选择

1. 解读

在极限承载设计中，零部件必须能够承受给定的载荷或压力且不发生失效。通常 K_c 值取平面应变断裂韧度 K_{IC}，对应极端开裂条件，这样做比较安全。根据式（6.33）可知，适用于体积最小化设计的最佳材料是那些对应材料指标 M_1 值最大的材料：

$$M_1=K_{IC} \tag{6.34}$$

对于薄板的极限承载设计，使用平面应力断裂韧度较为合适。对于多层材料，界面断裂韧度可能更为合适。有一点非常确定，即对于极限承载设计，最佳材料是对应 K_c 值最大的材料。

但是，如前所述，并不是所有的设计都是极限承载设计。弹簧以及涡轮和飞轮的围护系统都是极限能量设计。以弹簧（参考图 6.11）为例，单位体积储存的弹性能为：

$$U_e=\frac{1}{2}\sigma\varepsilon=\frac{1}{2}\frac{\sigma^2}{E}$$

由于应力必须低于式（6.33）得出的破坏应力，假设“失效”即“断裂”，那么弹簧可以储存的能量最大值为：

$$U_e^{max}=\frac{C^2}{2\pi a_c}\left(\frac{K_{IC}^2}{E}\right)$$

当初始裂纹尺寸给定，选择对应 M_2 值最大的材料可以储存的能量最多。

$$M_2 = \frac{K_{\mathrm{IC}}^2}{E} \approx J_c \tag{6.35}$$

式中，J_c 是冲击韧度（$\mathrm{kJ/m^2}$）。

还有第三种情况：极限变形量设计（见图 6.17）。诸如紧扣的瓶盖和紧固件，都涉及极限变形量的设计。这些产品必须具有足够的弹性变形量，使得盖子在扣紧时不会失效。也就是说，要有较大的失效应变 ε_f。由胡克定律可知，$\varepsilon = \sigma/E$。根据式(6.33)，失效应变为：

$$\varepsilon_f = \frac{C}{\sqrt{\pi a_c}}\left(\frac{K_{\mathrm{IC}}}{E}\right)$$

极限变形量设计的最佳材料是对应材料指标 M_3 值最大的材料。

$$M_3 = \frac{K_{\mathrm{IC}}}{E}$$

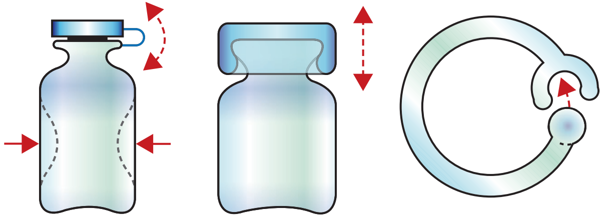


图 6.17 极限承载设计与极限变形量设计

（聚合物由于其弹性模量低，在极限变形量设计中用得较多。）

2. 选择

图 6.18 给出了断裂韧度 K_{IC} 与弹性模量 E 的关系图。在此基础上，利用材料指标 M_1、M_2 和

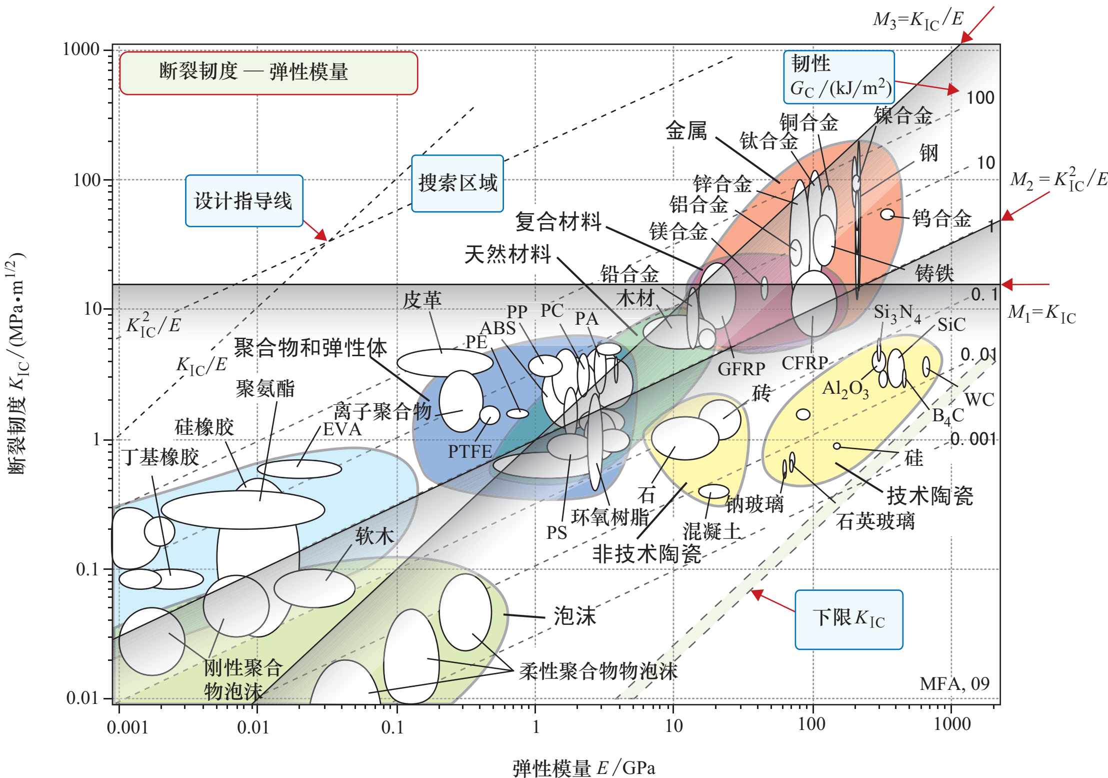


图 6.18 极限承载设计、极限能量设计和极限变形量设计中的材料选择

（尽管断裂韧度值较低，聚合物在极限变形量设计中可以与金属相媲美。）

M_3 可以对不同材料进行对比。依据工程师的经验，对于极限承载设计而言，材料指标 M_1 值大于 15MPa · $m^{1/2}$（图 6.18 中的一条水平线）的材料才能满足要求。因此，几乎所有的金属都适用，但聚合物和陶瓷材料则不符合要求。

图 6.18 中给出了一条对应 $M_2 = 1kJ/m^2$ 的直线。材料对应的 M_2 值相比 $1kJ/m^2$ 越大，其抗冲击性越好。对于工程师们而言，这是另外一个经验法则。金属、复合材料和一些聚合物都满足要求，陶瓷材料则不然。对于极限变形量设计，基准线取材料指标 $M_3 = K_{IC}/E$ 对应值为$10^{-3}m^{1/2}$的直线，由此可说明为什么聚合物会得到如此广泛的应用。在极限变形量设计中，聚合物尤其是聚丙烯、ABS 和尼龙，比任何金属都表现更好（见表 6.18）。

表 6.18 断裂极限设计选材

设计类型与经验法则	材料
极限承载设计 $K_{IC}>15MPa \cdot m^{1/2}$	金属、聚合物基复合材料
极限能量设计 $J_c>1kJ/m^2$	金属、复合材料和一些聚合物
极限变形量设计 $K_{IC}/E>10^{-3}m^{1/2}$	聚合物、弹性体和高韧性金属

3. 附言

上述图表使我们深刻地认识到，机械工程师对金属的青睐（近来更喜欢复合材料），并不仅仅是因为 K_{IC} 值，而是因为金属对应三个指标（K_{IC}，K_{IC}^2/E 和 K_{IC}/E）的表现都很好。聚合物的 K_{IC}/E 值很不错，K_{IC}^2/E 值也可接受。陶瓷材料对应这三个指标的表现都很差，这就是陶瓷不受工程师们信赖的深层次原因。

相关阅读：

Background in fracture mechanics and safety criteria can be found in

Brock, D. (1984). *Elementary engineering fracture mechanics*, Martinus Nijoff.

Hellan, K. (1985). *Introduction to fracture mechanics*. McGraw-Hill.

Hertzberg, R. W. (1989). *Deformation and fracture mechanics of engineering materials*. Wiley.

相关案例：

见“弹簧材料”（见 6.7 节）、“弹性铰链和联轴器”（见 6.8 节）、“安全压力容器”（见 6.11 节）。

6.11 安全压力容器

从最简单的气雾罐到大型锅炉，压力容器的设计要素始终是安全，因而会被设计成屈服或泄漏先于容器爆炸发生。相应的设计方法各有不同。小型压力容器一般设计成在很低的压力下就允许发生屈服，从而避免引起容器内任何裂纹的扩展（即“爆炸前屈服”）。屈服造成的稳态变形很容易被检测到，这样就能及时地释放压力。但是对于大型压力容器，这种方法就不适用了。相反地，我们要确保可能发生非稳态扩展的最小裂纹尺寸都要大于容器壁厚（即“爆炸前泄漏”）。这样，泄漏会很容易被检测到，压力可以得到缓慢释放以确保安全（见表 6.19）。这两种情况对应着不同的材料指标，它们分别是怎样的呢？

表 6.19 安全压力容器的设计要求

功能	安全压力容器(可承受压力 p)
约束条件	规定的半径 R
目标	依据“爆炸前泄漏”或“爆炸前屈服”使安全性最大化
自由变量	材料选择

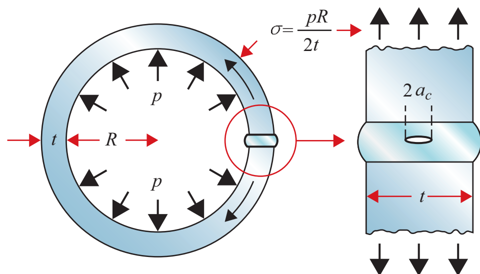


图 6.19 含微裂纹的压力容器（小型压力容器的安全设计要求在爆炸前屈服；大型压力容器要求在爆炸前泄漏。）

1. 解读

如图 6.19 所示半径为 R 的薄壁球形压力容器，器壁所受应力为：

$$\sigma = \frac{pR}{2t} \tag{6.36}$$

在压力容器设计中，壁厚 t 设计的原则是：工作压力为 p 时，器壁所受应力要比材料的屈服强度 σ_f 小（当然，需要考虑安全系数）。小型压力容器可以采用超声或 X 射线检测，或通过试验来验证，确认其内部无裂纹或裂纹直径不超过 $2a_c^*$。这样，引起裂纹扩展的应力为：

$$\sigma = \frac{CK_{\mathrm{IC}}}{\sqrt{\pi a_c^*}} \tag{6.37}$$

式中，C 是常数，约等于 1；K_{IC} 是平面应变断裂韧度。当工作压力小于该值时，压力容器的安全可以得到保障，即：

$$p \leqslant \frac{2t}{R}\frac{K_{\mathrm{IC}}}{\sqrt{\pi a_c^*}} \tag{6.38}$$

假设 R、t 和 a_c^* 给定，对应材料指标 M_1 值最大的材料能承受的压力最大。

$$M_1 = K_{\mathrm{IC}} \tag{6.39}$$

但是，这种设计没有考虑失效保护。一旦检测出错或者由于某种原因出现长度大于 a_c^* 的裂纹，将产生灾难性的后果。更安全的做法是使得应力即便达到屈服强度，裂纹也不会扩展。这样，容器的稳态变形可以被洞察到，从而及时采取措施。为满足该条件，使得式(6.37)中的 σ 与屈服强度 σ_y 相等即可。由此，可得到

$$\pi a_c \leqslant C^2\left(\frac{K_{\mathrm{IC}}}{\sigma_y}\right)^2$$

由上式可知，选择对应材料指标 M_2 值最大的材料，能够使得容器的可容许裂纹尺寸最大化。

$$M_2 = \frac{K_{\mathrm{IC}}}{\sigma_y} \tag{6.40}$$

大型压力容器并不能经常采用 X 射线或者声波进行检测，验证试验更是不切实际。再者，由于腐蚀和循环载荷的存在，裂纹会逐渐扩展，在服役初期单次的测量显然是不够的。只有确保裂纹在其尺寸沿壁厚方向大于壁厚时，仍处于稳态扩展过程，才能保障容器的安全，因为裂纹引起的泄漏很容易被检测到。假定 $a_c^* = t/2$，如果应力永远小于或者等于式(6.41)对应的 σ 值，容器的安全就能得到保证。

$$\sigma = \frac{CK_{\mathrm{IC}}}{\sqrt{\pi t/2}} \tag{6.41}$$

当然，压力容器的壁厚 t 要确保器壁承受压力 p 时不发生屈服。由式（6.38）可得：

$$t \geqslant \frac{pR}{2\sigma_\gamma} \tag{6.42}$$

将式（6.42）代入前述等式，且取 $\sigma = \sigma_\gamma$ 可得到：

$$p \leqslant \frac{4C^2}{\pi R}\left(\frac{K_{\mathrm{IC}}^2}{\sigma_\gamma}\right) \tag{6.43}$$

对应材料指标 M_3 值最大的材料可安全承受的压力最大。

$$M_3 = \frac{K_{\mathrm{IC}}^2}{\sigma_\gamma} \tag{6.44}$$

通过减小器壁的屈服强度 σ_γ，材料指标 M_2 和 M_3 的值可以得以增大。例如铅，它对应这两项材料指标的值都很大。但是，不能选铅作为压力容器的材料，因为不论是出于材料成本还是轻质的考虑，容器壁都应尽可能薄。由式（6.42）可知，为获得最薄的容器壁，需选择屈服强度 σ_γ 最大的材料。因此，我们还需要将材料指标 M_4 的值最大化，从而进一步缩小材料选择的范围。

$$M_4 = \sigma_\gamma \tag{6.45}$$

2. 选择

图 6.20 描述了断裂韧度 K_{IC}与强度 σ_f（对金属和聚合物而言，该值是屈服强度）的关系。材料的选择过程基于图 6.20 来完成。材料指标 M_1、M_2、M_3 和 M_4 分别对应斜率为 0，1 和 1/2 的直线，以及一条垂直线。以“爆炸前屈服”为例，对应材料指标 $M_2 = K_{\mathrm{IC}}/\sigma_\gamma$ 的一条对角线所穿过的材料有着相同的性能，位于该线之上的材料则性能更好。图中材料指标 M_2 的基准线对应断裂过程区直径 d_γ 为 10mm 的情况。尽管一些如 PP、PE 和 PET 之类的聚合物已用于制造加压柠檬水瓶和啤酒瓶，但基于该选择基准线，符合要求的材料只有钢、铜、铝合金和钛合金（见表 6.20）。

表 6.20 安全压力容器材料

材料	$M_2 = (K_{\mathrm{IC}}/\sigma_y)/\mathrm{m}^{1/2}$	$M_4 = \sigma_y/\mathrm{MPa}$	备注
不锈钢	0.35	300	核压力容器是由 316 不锈钢制成
低碳钢	0.2	800	标准应用
铜	0.5	200	硬拉拔铜常被用于小型锅炉和压力容器
铝合金	0.15	200	火箭压力箱由铝合金制成
钛合金	0.13	800	对于小型压力容器是较好选择，但是较贵

“爆炸前泄漏”设计准则为：

$$M_3 = \frac{K_{\mathrm{IC}}^2}{\sigma_\gamma}$$

因此，低合金钢、不锈钢和碳钢更受青睐，聚合物则不再胜任。

3. 附言

大型压力容器均由钢制成，模型则一般由铜制成。尽管铜的成本较高，但其耐蚀性更强，因此在模型制作中更受青睐。一般来说，腐蚀速率与尺寸不成比例。对于 10mm 厚的压力容器，0.1mm 的腐蚀量并不会产生严重后果。但是对于壁厚为 1mm 的压力容器，0.1mm 的腐蚀量就不可轻视了。

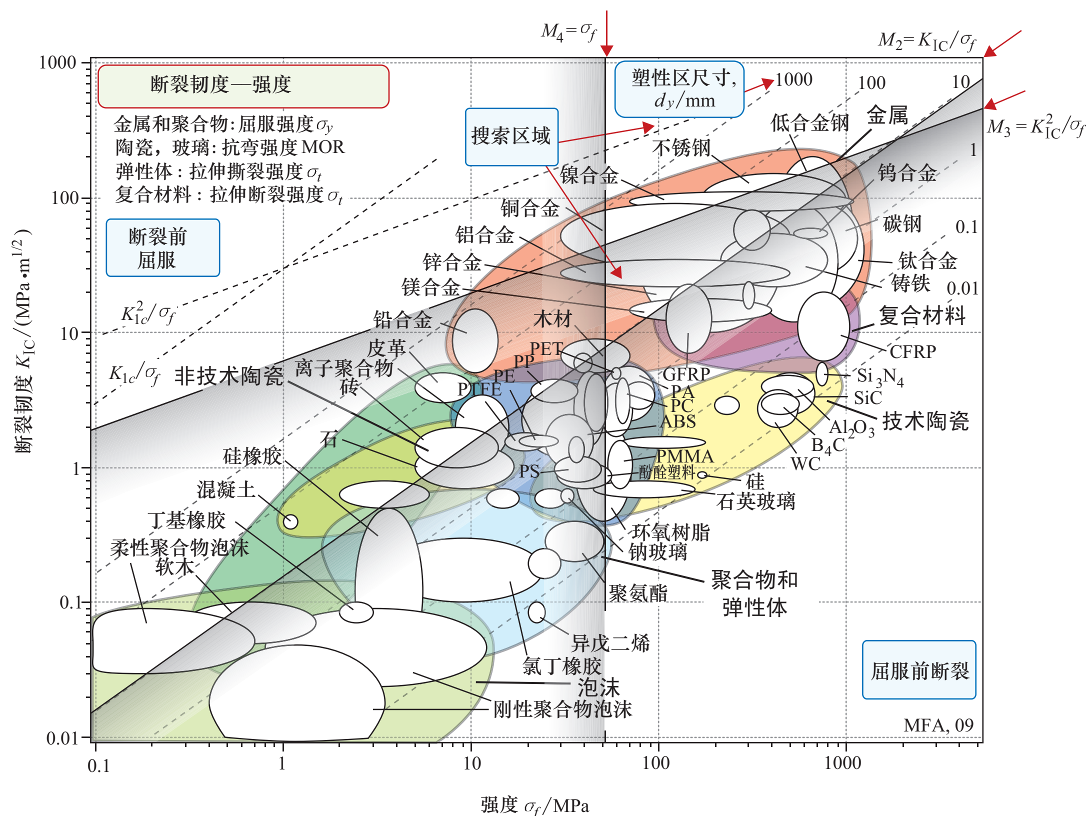


图 6.20　压力容器材料的选择（钢、铜合金和铝合金是“爆炸前屈服”设计准则的最佳材料。此外，器壁的屈服强度越高，容器所能承受的工作压力越高，因此三角形“搜索区域”内的材料是最佳选择。“爆炸前泄漏”设计准则可得到相同的结果。）

锅炉失效在过去司空见惯，甚至还有相关的歌曲描述。如今这类情况已经很少发生。尽管设计中的安全边际已被减到极致，压力容器的失效也仅仅是偶尔才会发生。这一切都要归功于断裂力学在工程实践中的应用。

相关阅读：

Background in fracture mechanics and safety criteria can be found in

Brock, D. (1984). *Elementary engineering fracture mechanics*. Martinus Nijoff.

Hellan, K. (1985). *Introduction to fracture mechanics*. McGraw-Hill.

Hertzberg, R. W. (1989). *Deformation and fracture mechanics of engineering materials*. Wiley.

相关案例：

见“飞轮材料”（见 6.6 节）、“脆性聚合物的极限变形量设计”（见 6.10 节）、“多约束：轻质压力容器”（见 8.2 节）。

6.12　用于振动台的高刚性、高阻尼材料

Shakers 特指震教徒，是衰退的新英格兰宗教派的成员，以其简朴的木制家具闻名。

然而对于非教徒而言，Shakers 代表的是如图 6.21 所示的振动测试装置。这类振动台利用电磁驱动器来驱动工作台，工作频率可达到 1000Hz。工件如航天探测器、汽车以及飞机组件等器件，被固定在工作台上进行测试。振动台可在不同频率 f 和振幅 A 下对工件进行测试。

高频工作的大型工作台会损耗大量能量，因此设计的主要目标是在满足表 6.21 列出的一系列约束条件的前提下，使能量损耗最小。那么，什么材料是制造振动工作台的最佳材料呢？

表 6.21 振动台的设计需求

功能	振动测试装置的工作台
约束条件	指定的半径 R
	必须有足够的刚度以防在夹持力下弯曲
	自振频率比最大的运行频率要高（防止共振）
	高的阻尼以抑制共振以及自振强度足以经受夹紧力和误操作
目标	最小的能耗
自由变量	材料的选择
	工作台的厚度 t

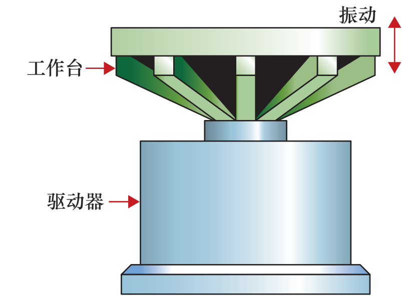


图 6.21 振动台（要求刚性好，且具有较高的固有“阻尼”或损耗系数。）

1. 解读

正弦振动系统的能量损耗 p（单位：W）为：

$$p = C_1 m A^2 \omega^3 \tag{6.46}$$

式中，m 是工作台的质量；A 是振幅；ω 是角速度（rad/s）；C_1 是常数。假设工作频率 ω 远小于工作台的共振频率，那么 $C_1 \approx 1$。振幅 A 和角速度 ω 是预先设定的。为了减小工作台本身的能量损耗，必须设法减小工作台的质量 m。我们将工作台简化为圆盘，给定半径 R，厚度 t 是自由变量。此时，工作台的质量为：

$$m = \pi R^2 t \rho \tag{6.47}$$

式中，ρ 是工作台材料的密度。厚度会影响工作台的弯曲刚度，进而影响工作台在夹持重物情况下的挠度变形。此外，厚度对工作台的固有频率起决定性作用。弯曲刚度 S 的计算公式为：

$$S = \frac{C_2 EI}{R^3}$$

式中，C_2 是常数。截面惯性矩 I 与 $t^3 R$ 成比例。因此，当刚度 S 和半径 R 给定时，

$$t = C_3 \left(\frac{SR^2}{E}\right)^{1/3}$$

式中，C_3 是另外一个常数。若要工作台最薄，就要选择对应材料指标 M_1 值最大的材料。

$$M_1 = E$$

把 t 的表达式代入式（6.47），可得：

$$m = C_3 \pi R^{8/3} S^{1/3} \left(\frac{\rho}{E^{1/3}} \right) \tag{6.48}$$

对于给定刚度和最小振动频率的情况，选择材料指标 M_2 值较大的材料可以减小工作台的质量。

$$M_2 = \frac{E^{1/3}}{\rho}$$

除此以外，还有另外三个要求。第一，工作台材料要具有较高的机械阻尼以防止共振，阻尼性能可用损耗系数 η 来衡量；第二，工作台的屈服强度和断裂韧度 K_{IC} 必须能够大，可经受夹紧力和误操作；第三，工作台不能太厚。

2. 选择

如果存在横轴为 $E^{1/3}/\rho$、纵轴为 η 的材料性能图，那么我们可以很容易地选出两个参数都大的材料。在后面的案例中，我们会发现基于计算机方法可以绘制出以任意材料性能为坐标轴的图表。但是现在，我们依然以第 4 章的图为依据，分两步来完成材料选择。图 6.4 为弹性模量 E 与密度 ρ 的关系图，图中有一条对应材料指标 $E^{1/3}/\rho$ 的选择基准线。表 6.22 的第一列给出了高于这条线以及略低于这条线的一些材料。接下来我们看一下 η-E 图（见图 6.22）。对应材料指标 M_1 值较大的候选材料位于竖直线（E = 30GPa）的右侧以及水平线（η = 0.001）的上方。搜索区域内包含 CFRP、镁合金、铝合金和钛合金材料，所有这些都是候选材料。表 6.22 对材料性能进行了详细比较。

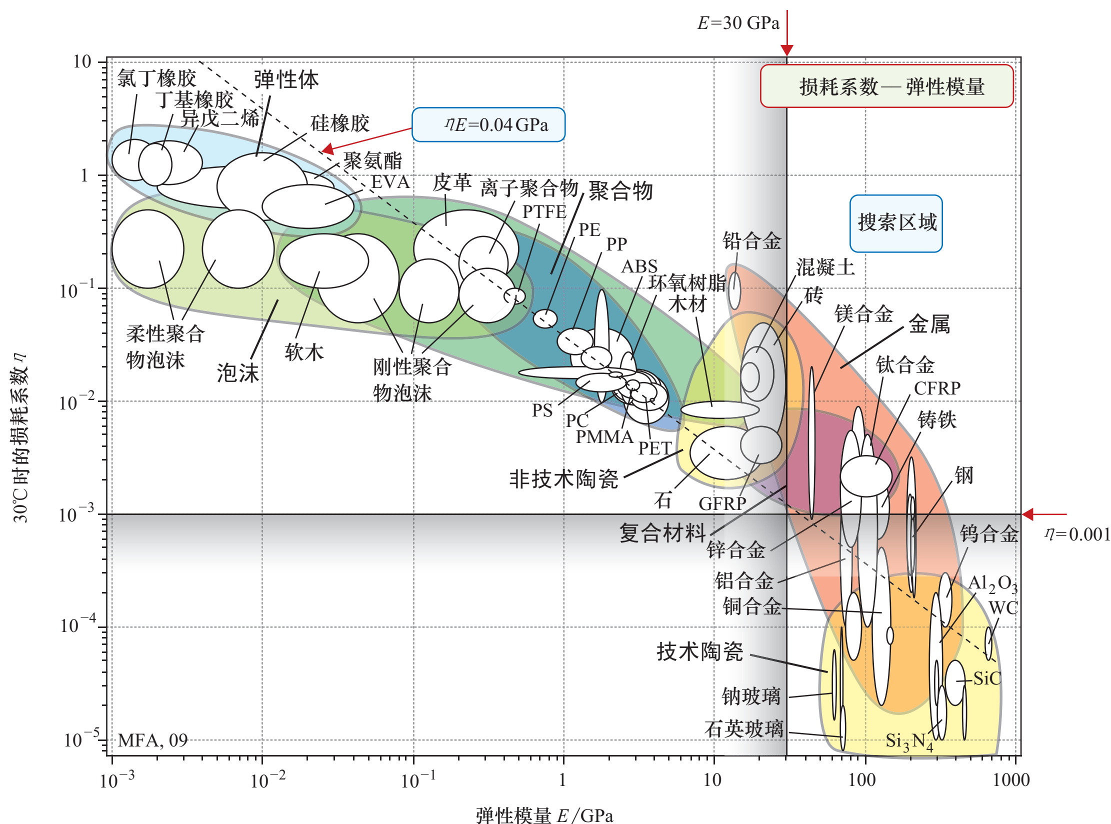


图 6.22 振动台材料的选择（镁合金、铸铁、GFRP、混凝土和特种高阻尼 Mn-Cu 合金都是候选材料。）

表 6.22 振动台材料的选择

材 料	$M_1=(E^{1/3}/\rho)$ /[$GPa^{1/3}$/(Mg/m^3)]	损耗系数 η	断裂韧度 K_{IC}/($MPa\cdot m^{1/2}$)	备 注
镁合金	≤2.3	≤0.03	15	最好的性能组合
铝合金	≤1.7	≤0.002	30	相比镁和钛有更小的阻尼
钛合金	≤1.1	≤0.003	60	阻尼大,但是价格贵
CFRP	≤3.4	≤0.003	15	相比镁合金有更小的阻尼,但基本可行
各种陶瓷	≤3.0	约 0.0002	3	因阻尼和断裂韧度低而排除
各种泡沫	≤10	≤0.5	0.1	强度和断裂韧度不足以承受高载荷

3. 附言

在诸如发动机、机床垫铁、精密仪器底座和建筑地基等工程应用中，刚性、高固有频率和高阻尼是需要重点考量的性能。与现实情况一样，本例中振动台的最佳材料为铸造镁合金。

有时候多种材料的组合是一种不错的方案（详见第 11 章）。查阅损耗系数的图表可以发现，聚合物和弹性体具有很好的阻尼性能。对于易发生振动的薄钢板仪表盘，可以在其表面覆盖一层聚合物来增大阻尼。该技术已广泛用于汽车、打字机和机床领域。铝合金结构可以采用碳纤维进行钢化，以增加其固有频率。类似处理方法常用在飞机设计中。对于承受弯曲或扭转载荷的结构，在刚度相同的情况下，可以采用合适的形状（比如在底面上设置加强筋）来增加其固有频率，从而实现减重。振动台包括新英格兰震教徒的木质工作台，其形状都是基于上述原理来设计的。

相关阅读：

Tustin, W, & Mercado, R. (1984). *Random vibrations in perspective*. Tustin Institute of Technology Inc., Santa Barbara.

Cebon, D., & Ashby, M. F. (1994). Materials selection for precision instruments. *Meas. Sci. and Technol.*, 5, 296-306.

相关案例：

见“桌腿材料”（见 6.4 节）、“弹簧材料”（见 6.7 节）、“用于精密仪器的低热变形材料”（见 6.16 节）。

6.13 短时恒温容器的隔热层

为应对紧急情况，军用飞机上的乘员会随身携带一个无线电发射器。如果被迫跳舱，乘员可能会身处恶劣的环境，比如 4℃ 的水里（地表海水的平均温度接近这个值）。发射器能够为营救提供线索，最大限度地减少营救时间。

像人一样，微电子的“新陈代谢”在低温下会发生紊乱。对于发射器，其传输频率在低温下会出现漂移。图 6.23 所示为微电子设备的蛋形外壳，其设计要求为：当外部温度变化 30℃ 时，内部温度在 1h 内不能发生太大变化。为确保装置小巧，壁厚不能超过 20mm。那么，

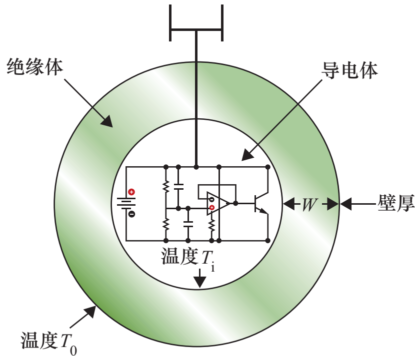


图 6.23 恒温容器（设计要求是当外部温度突变时，内部温度保持不变的时间最长。）

这个外壳的最佳材料是什么呢？杜瓦系统易碎，显然不适用于上述情况。

你的第一感觉可能会是泡沫材料。但是在本例中，直觉会让你误入歧途。所以，让我们首先来厘清设计要求（见表 6.23），然后再进行材料选择。

表 6.23 短时恒温容器的设计需求

功能	短时恒温容器
约束条件	壁厚不能超过 w
目标	当外部温度骤降时，内部温度需要在时间 t 内不变
自由变量	材料的选择

1. 解读

取容器壁厚为 w，导热系数为 λ。当处于稳态时，容器壁的热流密度 q 可由菲克第一定律得到：

$$q=-\lambda\frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}x}=\lambda\frac{(T_i-T_o)}{w} \tag{6.49}$$

式中，T_o 是外部环境温度；T_i 是内部温度；$\frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}x}$是温度梯度。导热系数 λ 是唯一的自由变量。要使热通量最小，选择 λ 值最小的容器壁材料即可。由图 6.24 的 λ-a 关系图可知，λ 最小的确实是泡沫材料。

但是，我们的设计要求并不是使容器壁的热通量最小，而是使内部温度保持近似恒定的时间尽可能长。当表面温度突然改变，外部温度的变化就会逐渐渗透到内部，引起内部温度的变化。在时间 t 内热量的扩散距离 x 为$\sqrt{2at}$。其中，a 是热扩散率，定义为：

$$a=\frac{\lambda}{\rho C_p} \tag{6.50}$$

式中，ρ 是密度；C_p 是比热容（见附录 B）。取扩散距离 x 等于容器壁厚 w，可得：

$$t\approx\frac{w^2}{2a} \tag{6.51}$$

要使时间最长，必须选择热扩散率 a 最小的材料，而不是选择导热系数最小的材料。

2. 选择

由图 6.24 可知，泡沫的热扩散率并不低，因为其密度极低，导致体积热容很小。而聚合物和弹性体的热扩散系数就低得多，因为这些材料的比热容特别大。在相同厚度情况下，外壳由橡胶、氯丁橡胶或者异戊二烯做成的发射器比外壳由聚苯乙烯泡沫做成的发射器的使用寿命长 10 倍，当然前者要重一些。表 6.24 对此作了总结。根据式（6.51），读者可自行验证，由氯丁橡胶（根据图 6.24，氯丁橡胶的热扩散率 $a=5\times10^{-8}\mathrm{m^2/s}$）制成的 22mm 厚的容器在外部温度突然变化后，内部温度至少在 1h 后才会发生明显变化。

3. 附言

通过引入吸热的方式，我们或许可以获得更好的解决方案。如果能找到一种液体，比如低熔点的蜡，其凝固温度等于发射器的最低工作温度（T_i），那么这种材料可以被用

作“潜热容器”。容器外壳内设置通道并填充液体，内部温度只有在所有液体凝固后才能降到最小工作温度以下。凝固潜热的存在，使得外壳的比热容明显提高，因此在温度 T_i 时热扩散率很低。反之，这个想法也可用作“冷冻包装”，首先将材料置于冰箱低温室内凝固，再包裹于温啤酒罐外，置于便携式冷藏箱中可保冷（熔解温度是 4℃）。

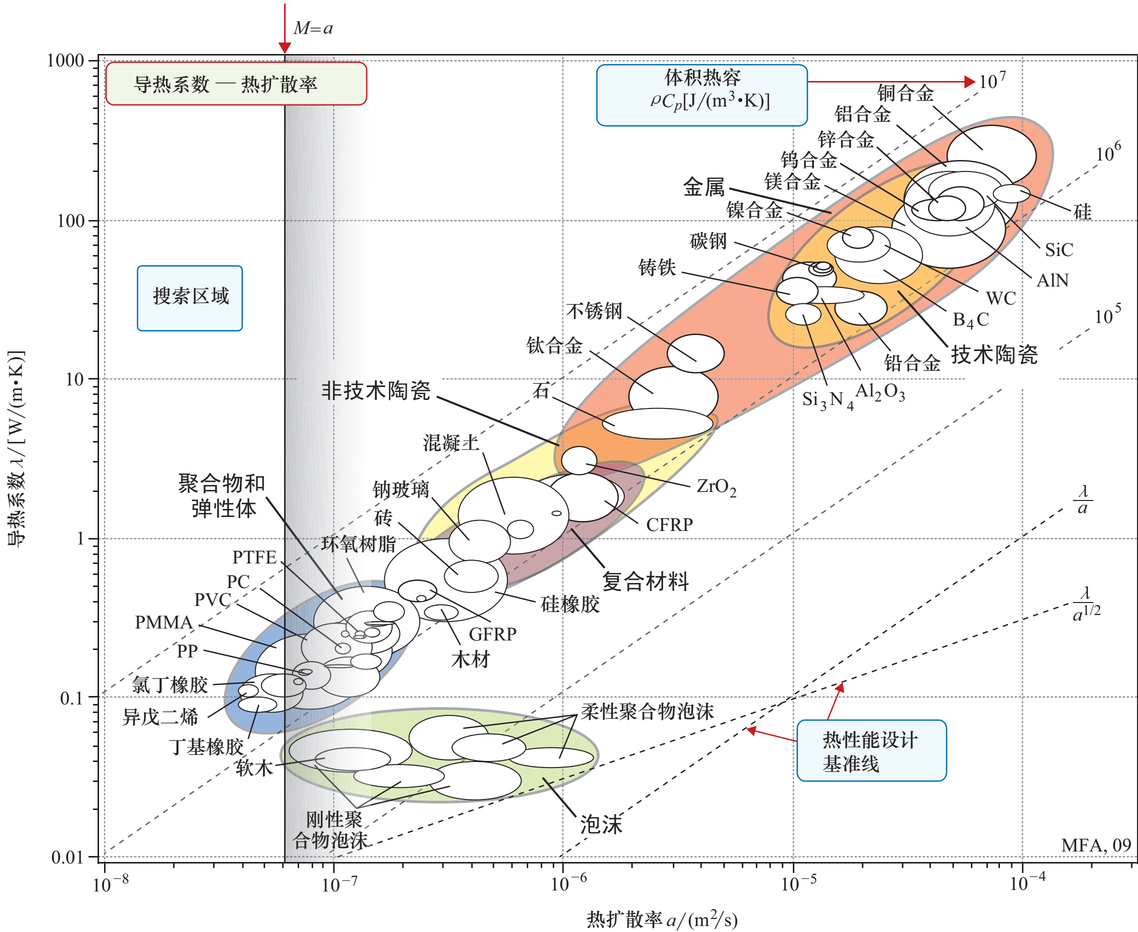


图 6.24 短时恒温容器材料的选择（弹性体是不错的选择，泡沫则不符合要求。）

表 6.24 短时恒温容器的材料的选择

材料	备注
弹性体：丁基橡胶，氯丁橡胶，异戊二烯等	短时恒温容器材料的最佳选择
商用聚合物：聚乙烯和聚丙烯	相比弹性体更为便宜，但是对于短时恒温容器而言不是很好的选择
聚合物泡沫	远没有弹性体好；对于稳态下的长时恒温容器是最好的选择

相关阅读：

Holman, J. P. (1981). *Heat transfer* (5th ed.) McGraw-Hill.

相关案例：

见“节能炉壁”（见 6.14 节）“被动式太阳能供暖装置用材料”（见 6.15 节）。

6.14 节能炉壁

图 6.25 所示的陶瓷窑，在一个加热周期内的能量消耗是极大的。其部分能量的消耗是由炉壁的热传导造成。选择导热系数 λ 低的炉壁材料，同时增大壁厚，就可以减少能量损失。其余能量用于把窑炉加热至工作温度。选择比热容 C_p 低的炉壁材料同时减小壁厚，就可以减少这部分的能量损耗。有没有一种材料指标能用于这组明显相互矛盾的设计目标？如果有，应该选择什么材料？表 6.25 给出了设计要求。

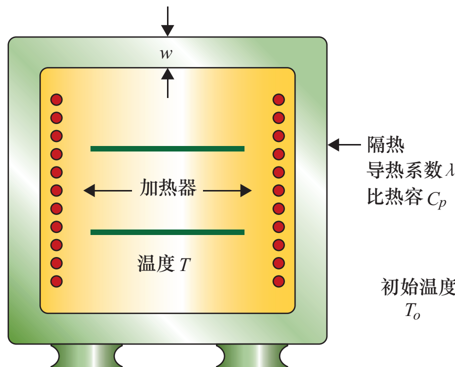


图 6.25 窑炉（首先将炉壁加热到工作温度，随后保温。炉壁内温度呈线性梯度。）

表 6.25 窑炉壁的设计需求

功能	窑炉保温(周期加热和冷却)
约束条件	最高工作温度 1000℃ 炉壁因空间原因不能太厚
目标	在燃烧周期内能耗最小
自由变量	窑炉壁厚 w 材料选择

1. 解读

加热炉子，使得炉内温度从环境温度 T_o 快速升至工作温度 T_i，整个加热时间为 t。如上所述，在这段时间内能量消耗主要由两方面造成。一是炉壁对外的热传导。由热力学第一定律可知：在稳态下，时间 t 内单位面积上热传导造成的能量消耗为 Q_1：

$$Q_1=-\lambda\frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}x}t=\lambda\frac{(T_i-T_o)}{w}t \tag{6.52}$$

式中，$\mathrm{d}T/\mathrm{d}x$ 是温度梯度；w 是隔热墙厚度。二是在炉子升温至 T_i 过程中炉壁吸收的热量。对此，单位面积的能量消耗为：

$$Q_2=C_p\rho w\left(\frac{T_i-T_o}{2}\right) \tag{6.53}$$

式中，C_p 是炉壁材料的比热容；ρ 是材料密度。因此，单位面积的能量消耗总和为：

$$Q=Q_1+Q_2=\lambda\frac{(T_i-T_o)}{w}t+C_p\rho w\left(\frac{T_i-T_o}{2}\right) \tag{6.54}$$

炉壁越薄，热传导造成的能量损耗就会越多，但是加热过程中炉壁自身吸收的能量也就越少。炉壁越厚，则正好相反。因此，必然存在一个最佳厚度。对式（6.54）中的 w 求导，令导数为零，可得到：

$$w=\left(\frac{2\lambda t}{C_p\rho}\right)^{1/2}=(2at)^{1/2} \tag{6.55}$$

式中，$a=\lambda/\rho C_p$ 是热扩散率。$(2at)^{1/2}$ 的单位为长度单位，是热量在时间 t 内能扩散的

距离。由式(6.55)可以看出，外表面温度只在炉子加热过程接近尾声时才开始升高的炉壁是最节能的。将式(6.55)代入式(6.54)，消去 w 得：

$$Q=(T_i-T_o)(2t)^{1/2}(\lambda C_p\rho)^{1/2}$$

选择对应 $(\lambda C_p\rho)^{1/2}$ 值越小的材料，损耗的总能量 Q 就越小。换言之，材料对应的 M 值越大，损耗的总能量 Q 就越小。

$$M=(\lambda C_p\rho)^{-1/2}=\frac{a^{1/2}}{\lambda} \tag{6.56}$$

将壁厚 w 从材料指标中消除后，使得我们无法了解炉壁的厚度情况。对于某些材料，厚度可能会异常得大。在确定某种候选材料前，我们需要根据式(6.55)来检查一下由这种材料制成的炉壁厚度。

2. 选择

图 6.26 给出了导热系数 λ 与热扩散率 a 的关系图，图中还增添了额外的耐火材料与泡沫，以及对应材料指标 $M=a^{1/2}/\lambda$ 的选择基准线。聚合物泡沫、软木塞和固态聚合物都是好的候选材料，但前提条件是炉内最高温度不能超过 150℃。陶瓷窑的实际工作温度高达 1000℃，因此要求炉壁材料的最高工作温度必须在该温度之上。从图中可以看出，砖是符合要求的（见表 6.26）。然而，硬拷贝图表的局限性此时显现了出来，图表中没有足够的空间来显示专用材料（如耐火砖和混凝土）。第 5 章提到的基于计算机辅助的方法可以克服上述缺点，因为计算机允许在更大范围内进行材料搜索。

材料选定后，可根据式(6.55)计算出炉壁的厚度。针对加热时间为 3h（接近 10^4s）的情况，表 6.26 列出了各类材料所对应的炉壁厚度。

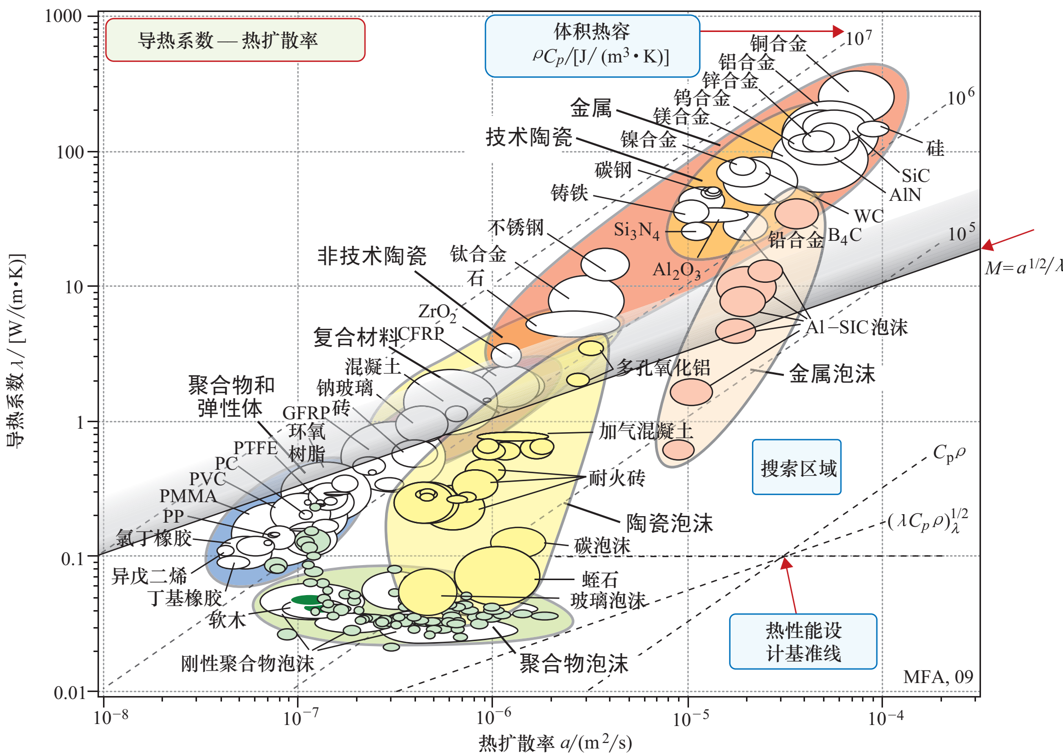


图 6.26 炉壁材料的选择（低密度、多孔或泡沫状陶瓷是最佳选择。）

表 6.26 节能窑炉材料

材料	$M=a^{1/2}/\lambda/[m^2K/(W\cdot s^{1/2})]$	厚度 W/mm	备注
耐火砖	5×10^{-3}	100	很明显的选择;密度低且性能好。专业耐火砖的 M 值高至 3×10^{-3}
注气混凝土	2×10^{-3}	110	高温混凝土可以承受 1000℃ 的高温
玻璃和碳泡沫	$\leqslant10^{-2}$	140	都能提供优越的绝热性,但是最高工作温度都低于 800℃
木材	2×10^{-3}	60	史蒂文森"火箭"蒸汽轮机的锅炉利用木材来绝热
实心弹性体和聚合物	$2\times10^{-3}\sim3\times10^{-3}$ 2×10^{-3}	50	材料指标值高。当壁厚很薄时,非常有用。最高工作温度需在 150℃ 以内
聚合物泡沫,软木	$3\times10^{-3}\sim6\times10^{-2}$	50～140	M 值最高,因而用于房屋的绝热。最高工作温度应在 150℃ 以内

3. 附言

对于一个高效节能的窑炉而言，加热窑炉本身所造成的能量消耗与炉壁热传导所消耗的能量等同这种情况是不能被接受的。炉壁太厚绝对是个错误，这样做虽然减少了热传导能量的损失，但是由此引起的炉壁比热容增大，进而损耗的能量更大。

选择泡沫材料的原因在于其导热系数很小，比热容又低。对于中央供暖的屋子而言，白天供暖晚上关闭暖气的过程与高温炉的加热循环过程类似。考虑到温度 T_i 比较低，用于这类屋子的最佳材料是聚合物泡沫、软木或者玻璃纤维（玻璃纤维的热性能与泡沫相近）。但是基于本例可知，晚上关闭暖气所节省的能量并非如你所预期的那么多，因为早上重新供暖时需提供部分能量用于加热墙壁。

相关阅读：

Holman, J. P. (1981). *Heat transfer* (5th ed.). McGraw-Hill, ISBN 0-07-029618-9.

相关案例：

见"短时恒温容器的隔热层"（见 6.13 节）、"被动式太阳能供暖装置用材料"（见 6.15 节）。

6.15 被动式太阳能供暖装置用材料

将太阳能用于家庭供暖的方法有很多，包括太阳能电池、充液式换热器和固体热储层等。其中，最简单的是蓄热墙。厚墙的外表面在白天接收阳光直射，晚上内表面在气流的作用下将热量释放出来（见图 6.27）。这种方法的本质在于热量流经墙壁的时间大约是 12 个小时，即外表面开始接收热量 12h 之后，差不多晚上的时候内表面才开始释放白天所吸收的热量。我们假定，由于建筑原因墙壁的厚度不能超过 0.5m。那么什么墙壁材料具有长达 12 个小时热扩散时间的同时吸收的热量最大？表 6.27 给出了相应的设计要求。

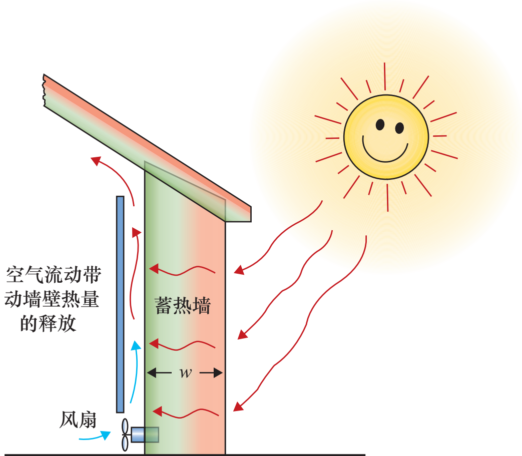


图 6.27 蓄热墙（白天阳光加热墙壁，晚上热量释放出来。墙壁的热扩散时间约 12h。）

表 6.27 被动式太阳能供暖装置用材料

功能	储 热 介 质
约束条件	墙壁的热扩散时间约 12h
	壁厚 ≤0.5m
	足够的工作温度，$T_{max}>100℃$
目标	单位材料成本的储热最大化
自由变量	壁厚 w
	材料的选择

1. 解读

温差为 ΔT 时，单位面积墙壁的热通量 Q，即目标函数为：

$$Q = w\rho C_p \Delta T \tag{6.57}$$

式中，w 是墙壁厚度；ρC_p 是体积热容。持续时间 12 个小时是约束条件。由时间 t 内热扩散距离的近似计算公式（附录 B），我们可以预估墙壁的厚度为：

$$w = \sqrt{2at} \tag{6.58}$$

式中，a 是热扩散率。消去自由变量 w，可得到：

$$Q = \sqrt{2t}\,\Delta T a^{1/2} \rho C_p \tag{6.59}$$

或者，依据 $a=\lambda/\rho C_p$，上式可变化为：

$$Q = \sqrt{2t}\,\Delta T\left(\frac{\lambda}{a^{1/2}}\right)$$

式中，λ 是导热系数。

要使墙壁获得最大的热通量，就要选择对应材料指数 M 值大的材料。

$$M = \frac{\lambda}{a^{1/2}} \tag{6.60}$$

该指标是上个案例的材料指标的倒数。由式(6.58)可知，厚度 ω 的限制条件要求

$$a \leqslant \frac{w^2}{2t}$$

针对 $w\leqslant 0.5\text{m}$，$t=12\text{h}$（$4\times10^4\text{s}$），我们可以得到一个属性限制条件

$$a \leqslant 3\times10^{-6}\,\text{m}^2/\text{s} \tag{6.61}$$

2. 选择

图 6.28 描述了导热系数 λ 与热扩散率 a 的关系图，同时给出了对应材料指标 M 的选择基准线以及 a 的限制区域。表 6.28 列出了图表识别出的候选材料。这些材料在满足墙壁厚度限制的前提下，对应的 M_1 值最大。实体材料表现很好，而多孔材料和经常

在墙壁中使用的泡沫则并不适用。

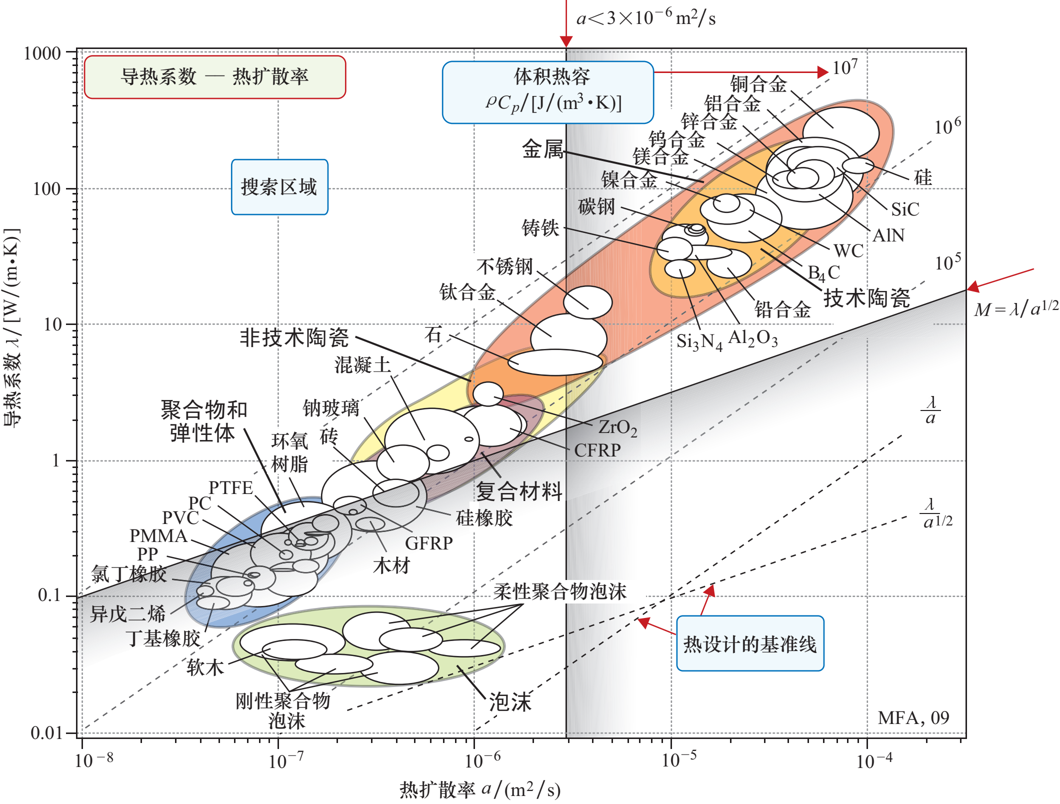


图 6.28 蓄热墙壁材料的选择（水泥、混凝土和石子都是实用选项，砖稍逊一些。）

表 6.28 被动式太阳能供暖装置用材料

材 料	$M_1=(\lambda/a^{1/2})$ /[W·s$^{1/2}$/(m²·K)]	大致成本/($/m³)	备 注
混凝土	2.2×10^3	200	最佳选择——成本最低但性能很好
石	3.5×10^3	1400	因为比热更大，所以性能比混凝土更好，但是更贵
砖	10^3	1400	没有混凝土好
玻璃	1.6×10^3	10000	有用——部分墙体可以使用玻璃
钛	4.6×10^3	200000	意想不到的选择，已被证实；昂贵

3. 附言

这样很好，那么成本如何呢？如果是建造房子，成本是必然要考虑的因素。依据附录 A 的表 A.5 和表 A.13，表 6.28 给出了各种材料的单位体积成本。对比可知，混凝土是最佳选择，石和砖次之。

相关案例：

见“短时恒温容器的隔热层”（见 6.13 节）、“节能炉壁”（见 6.14 节）。

6.16 用于精密仪器的低热变形材料

测量仪器（如亚微米位移计）的精度一般受限于其刚度以及温度梯度引起的尺寸变化。弹性变形的补偿很容易实现。假如设备处于均匀温度场中，对热膨胀的修正也是可以做到的。但是，温度梯度导致的形状变化，即仪器的变形是难以进行补偿的。振动敏感度同样是一个问题。自振会引起噪声干扰，从而造成测量误差。假如精密仪器不会发生变形，那么设计时也就无需担忧热膨胀的问题了；假如自振频率很高，那么弹性变形的存在也是容许的。

那么，精密仪器的材料该怎么选择呢？表 6.29 列出了相关设计要求。

表 6.29 精密仪器的设计要求

功能	精密仪器的受力环
约束条件	必须可以耐热
	必须能承受振动
目标	位置精度最大化(变形最小化)
自由变量	材料的选择

1. 解读

图 6.29 给出了这样一台精密测量仪器。它由探针、受力环、执行机构和传感器组成。本案例要选择的是适合做受力环的材料。通常，受力环会接触热源。这些热源来自操作者的手指，或电子器件产生的热量。我们以简单的一维杆传热为例，来获取所需的材料指标。将杆的一端置于环境温度中，另一端连接到热源，除杆的两端外，其余部位均绝热。稳态情况下，满足傅里叶定律：

$$q=-\lambda\frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}x} \tag{6.62}$$

式中，q 是热流密度；λ 是导热系数；$\frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}x}$是温度梯度。应变与温度的关系为：

$$\varepsilon=a(T-T_0) \tag{6.63}$$

式中，a 是热扩散率；T_0 是环境温度。形变量与温度梯度成比例关系：

$$\frac{\mathrm{d}\varepsilon}{\mathrm{d}x}=\frac{\alpha\mathrm{d}T}{\mathrm{d}x}=\left(\frac{a}{\lambda}\right)q$$

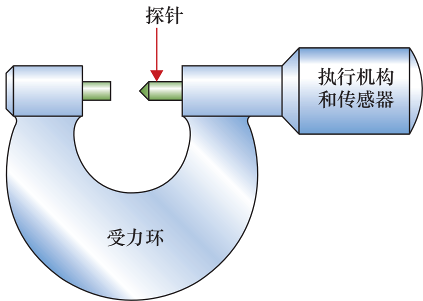


图 6.29 精密测量仪器的示意图
（超精密的尺寸测量仪器有原子力显微镜和扫描隧道电子显微镜。）

因此，对于给定形状和热通量，通过选择对应材料指标 M_1 值最大的材料，可以使形变量 $\mathrm{d}\varepsilon/\mathrm{d}x$ 最小。

$$M_1=\frac{\lambda}{a} \tag{6.64}$$

另一个问题是振动。仪器的固有频率越高，对于外部激励的敏感度越小。挠曲振动有最小频率，其值与 M_2 成比例关系：

$$M_2 = \frac{E^{1/2}}{\rho}$$

要消除振动问题，M_2 值越大越好。当然，材料成本不能过高。

2. 选择

图 6.30 描述了热扩散率 a 与导热系数 λ 的关系，图中给出了对应 $\frac{\lambda}{a}$ 的选择基准线。利用 $\lambda/a = 10^7$ W/m 的选择基准线，我们可确立搜索区域。表 6.30 给出了相应的候选材料。依据图 4.3 获取的候选材料对应的 M_2 值也被列于表中。金属中的铜、钨和特种镍合金钢都有着最佳的 M_1 值，但由于密度过高，导致 M_2 值很小。针对本例，最佳的材料选择是高纯度硅，金刚砂也是不错的选择。

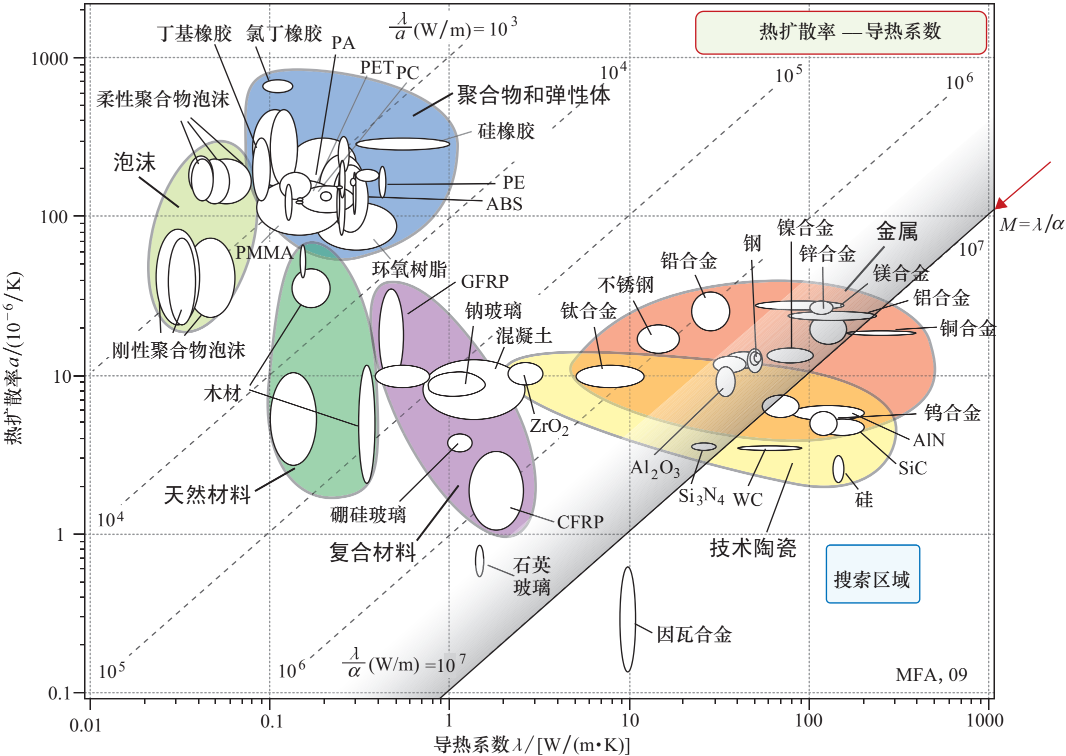


图 6.30 精密测量仪器材料的选择（金属的振动频率较低，不如陶瓷材料好；硅可能是最佳选择。）

表 6.30 热变形最小化设计的材料

材　料	$M_1 = (\lambda/a)/(\mathrm{W/m})$	$M_2 = (E^{1/2}/\rho)/[\mathrm{GPa}^{1/2}/(\mathrm{Mg\cdot m^{-3}})]$	备　注
硅	6×10^7	5.2	M_1 和 M_2 高
碳化硅	3×10^7	6.4	M_1 和 M_2 高，但是比硅难成形
铜	2×10^7	1.3	密度高，M_2 较低
钨	3×10^7	1.1	比铜、银、金好，但不及硅和碳化硅
铝合金	10^7	3.3	最便宜且最易成形的选择

3. 附言

纳米级测量与成像系统也会面临本例中所分析的问题。原子力显微镜和扫描隧道电子显微镜都采用探针方式。探针由受力环支撑，采用压电驱动器和电子器件来监测探针到测试面的距离。以我们的日常生活用品为例，录像机和硬盘驱动器从机理上也可以看作是精密仪器。他们的传感器（即读取头）及附带的电子器件也都安装在受力环上。本例所选出的材料是用于受力环的最佳材料。

相关阅读：

Chetwynd, D. G. (1987). Selection of structural materials for preclsion devices. *Precision Engineering*, 9 (1), 3.

Cebon, D., & Ashby, M. F. (1994). Materials selection for precision instruments. *Meas. Sci. and Technol*, 5, 296.

相关案例：

见“大型望远镜的反光镜”（见 6.3 节）、“短时恒温容器的隔热层”（见 6.13 节）。

6.17 换热器材料

本书第 5 章 5.5 节中提到过 CES 软件。本例与接下来的两个案例将详细介绍如何应用这个软件来进行材料选择。

换热器，是将热流体的部分热量传递给冷流体的设备，又称热交换器（见图 6.31）。蒸汽机的烟管就属于换热器的一种，从热燃烧气体中获取热量，再传送至锅炉水中。空调中的翅片管网络构成一个换热器，从屋内空气中吸收热量，再传送至空调内的工作液中。对于所有的换热器而言，关键元件是隔绝两种流体的管壁或隔膜。管壁或隔膜要求传热性能好。此外，管壁两侧常常伴有压力差，有时候压力差还很大。

那么，制造换热器的最佳材料是什么呢？或者更确切地说，对于管壁两侧流体有较大压力差，且其中一侧流体包含氯离子（海水）的换热器，其管壁的最佳材料是什么？表 6.31 给出了对应的设计要求。

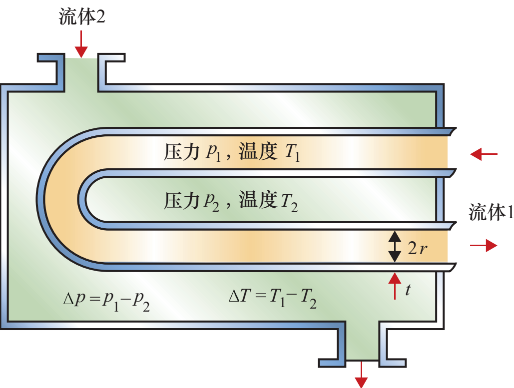


图 6.31 换热器（管壁两侧压力差为 Δp，温度差为 ΔT。管壁要能抗氯离子腐蚀。）

表 6.31 换热器的设计要求

功能	换热器
约束条件	承受压力差 Δp
	抗氯离子腐蚀
	工作温度达 150℃
目标	单位面积的热通量最大化（体积最小化）或单位质量的热通量最大化（质量最小化）
自由变量	管壁厚度 t
	材料选择

1. 解读

首先，介绍一下热传导的基本知识。热量从一种流体通过管壁，传到另一种流体，整个过程包含流体 1 到管壁的对流传热，管壁内部的热传导，然后另一侧管壁到流体 2 的对流传热。对流方式传到管壁的热流密度 q（W/m^2），可由传热方程得到：

$$q=h_1\Delta T_1 \tag{6.65}$$

式中，h_1 是传热系数；ΔT_1 是流体 1 与管壁表面的温差。导热量则由导热（或傅里叶）方程给出。对于一维热传导，公式如下：

$$q=\lambda\frac{\Delta T}{t} \tag{6.66}$$

式中，λ 是管壁（厚度为 t）的导热系数；ΔT 是管壁两侧的温差。将表面 1 的热阻视为 $1/h_1$，表面 2 的热阻视为 $1/h_2$，管壁本身的热阻视为 t/λ，则由热流密度的连续性可知，总的热阻 $1/U$ 为：

$$\frac{1}{U}=\frac{1}{h_1}+\frac{t}{\lambda}+\frac{1}{h_2} \tag{6.67}$$

式中，U 称为“总传热系数”。由此，从流体 1 到流体 2 的热流密度为：

$$q=U(T_1-T_2) \tag{6.68}$$

式中，(T_1-T_2) 是两种工作流体的温差。

如果其中一种流体是气体，则管壁一侧的对流传热构成主要的热阻。此时，可采用翅片来增加传热面积。如果两种工作流体都是液体，对流传热很迅速，此时管壁内的热传导构成主要的热阻。相比于 t/λ，$1/h_1$ 和 $1/h_2$ 基本可忽略。对于这种情况，常常采用简单管道或者板元件，并且使管壁尽量薄，以减小 t/λ 值。现在，我们来考虑另外一种情况，即极限导热系数换热器。热流密度还是采用式（6.66）进行估算。

该换热器由 n 根长度为 L 的管子组成，每根管子半径为 r，壁厚为 t。设计目标为选择一种材料，使总热流量最大。

$$Q=qA=\frac{A\lambda}{t}\Delta T \tag{6.69}$$

式中，$A=2\pi rLn$，是管壁总面积。

上式就是目标函数。约束条件是管壁必须能够承受内外两侧的压差 Δp（见图 6.31）。这就要求管壁内的应力必须小于管壁材料的屈服强度 σ_y（乘以安全系数，此处可省略）。

$$\sigma=\frac{\Delta pr}{t}<\sigma_y \tag{6.70}$$

由此，厚度 t 的最小值也有所限制。联立式(6.69)和式(6.70)，消去 t 可得：

$$Q=\frac{A\Delta T}{r\Delta p}(\lambda\sigma_y) \tag{6.71}$$

要使管壁的热流密度 Q/A 最大，需选择对应 M_1 值最大的材料。

$$M_1=\lambda\sigma_y \tag{6.72}$$

在选择过程中，我们还需要考虑其他因素。选择的材料必须耐工作液腐蚀；材料的最高工作温度必须远大于工作流体的最高温度；材料必须有足够的延展性，可以拉拔成管材或是轧制成板材。

2. 选择

基于图 6.32 描述的 λ-σ_y 关系图，结合材料指标 M_1，我们可以进行材料的初步选择。由图可知，变形铜合金是一种可能的材料。接下来，我们借助计算机辅助方法。设定最大工作温度为 150℃，30%的伸长率，材料成本低于 6$/kg，耐海水腐蚀，并且限定在铜合金里搜索。基于这些要求，我们重新生成了如图 6.33 所示的 σ_y 与 λ 的关系图，使得 $M_1=\lambda\sigma_y$ 最大化。表 6.32 列出了对应 M_1 值较大的材料。

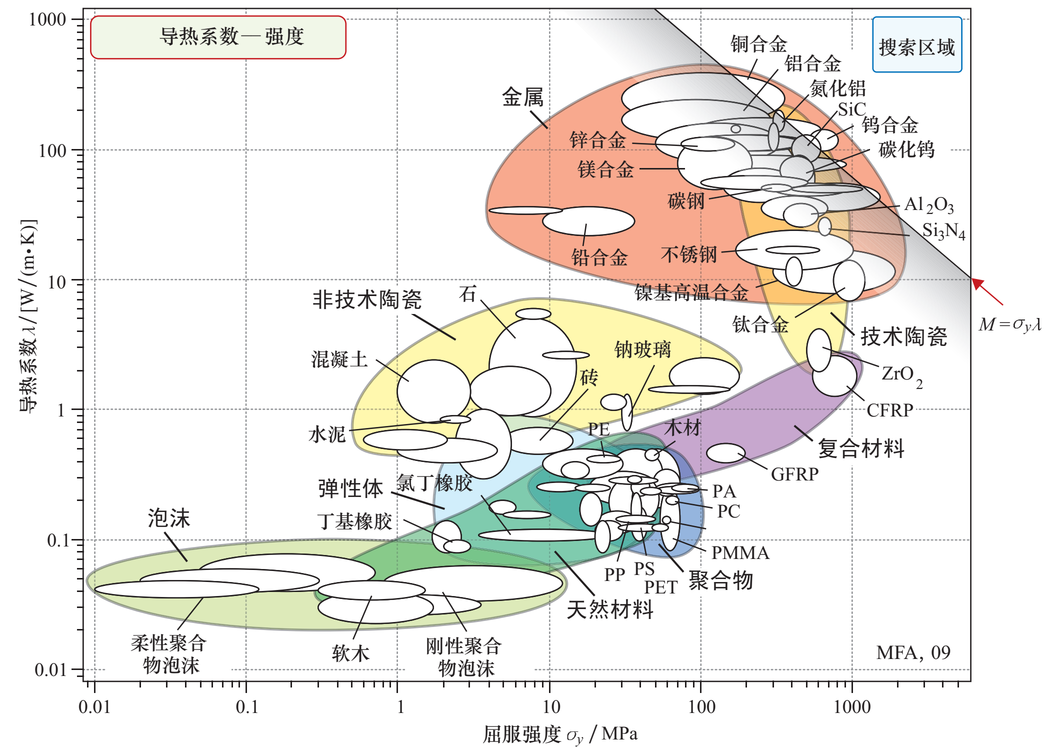


图 6.32 导热系数 λ 与屈服强度 σ_y 的关系图（图中引入了材料指标 M_1 的基准线。）

表 6.32 换热器材料的选择

材　　料	$M/[W \cdot MN/(m^3 \cdot K)]$	备　　注
黄铜，锡黄铜	5×10^4	易脱锌
磷青铜	4×10^4	便宜，但是抗腐蚀性没有铝青铜好
铝青铜，铸态	3.8×10^4	既经济又实用的选择
镍铁铝青铜	2.5×10^4	耐蚀性更强，但比较贵
硅青铜	2.2×10^4	没有铝青铜好

3. 附言

从理论上来说，热流量会受限于热传导，但是换热器的内部运作我们无法观测到。海水是常见的工作液体，其内部的附着性生物会依附在管壁上，并且像船上的藤壶一样快速生长，形成高热阻层，从而妨碍热流通。经文献查阅发现，铜镍合金对附着性生物有较好的抗性，即便在浓度很低的情况下。可能是因为这些生物组织不喜欢铜盐

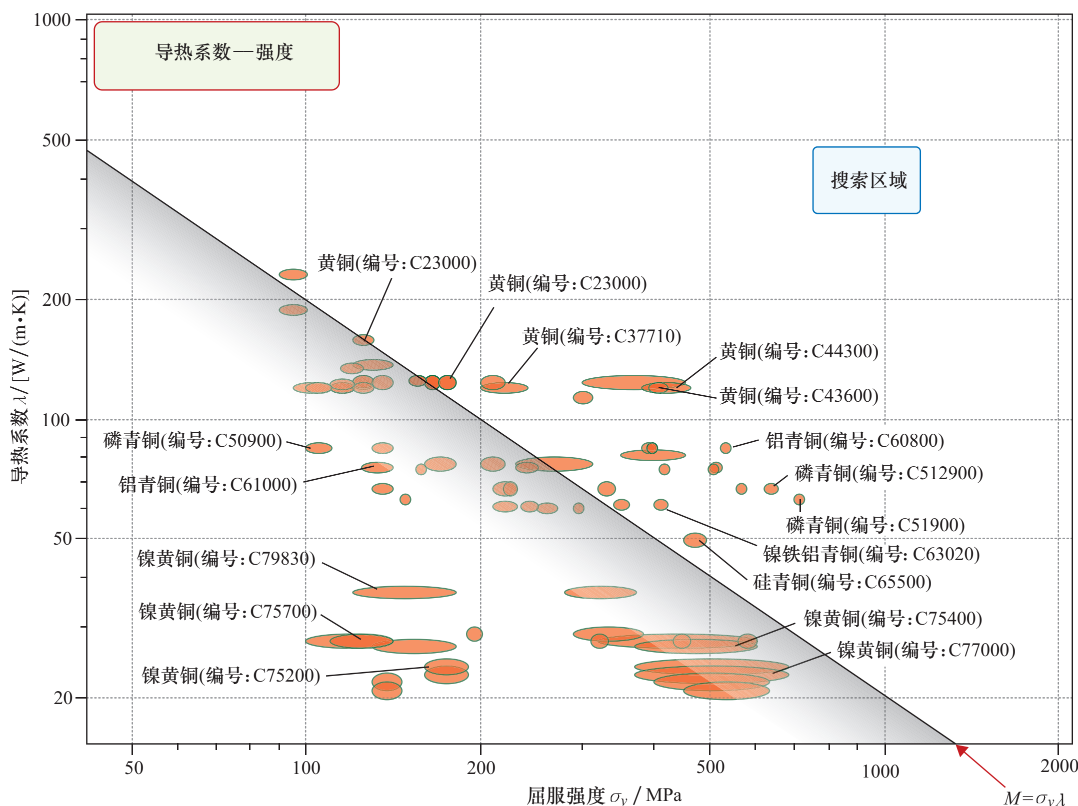


图 6.33 针对铜合金的导热系数 λ 与屈服强度 σ_y 的关系图（图中引入了材料指标 M_1 的基准线。）

的原因。否则，要解决这个问题，必须在流体中添加化学抑制剂或手动去除。这项工作是传统渔民在“休渔期”的主要工作。

有时候换热器的轻量化也很重要。重复上述计算过程，目标是寻找使得 Q/m 值最大化的材料（m 是管子的质量）。由此，可得到材料指标 M_2：

$$M_2 = \frac{\lambda \sigma_y^2}{\rho} \tag{6.73}$$

式中，ρ 是管材密度。公式中 σ_y 变成了二次项，是因为质量与厚度、密度均相关，且根据式（6.70）可知，壁厚随 $1/\sigma_y$ 变化。同理可推，对应材料指标 M_3 值最大的换热器最价廉：

$$M_3 = \frac{\lambda \sigma_y^2}{C_m \rho} \tag{6.74}$$

式中，C_m 是单位质量成本。针对这两种情况，铝合金对应的材料指标都很高，因为铝合金的密度小且成本低。选择过程在这里没有详述，我们可以借助 CES 系统快速完成。

相关阅读：

Holman, J. P. (1981). *Heat transfer* (5th ed.). McGraw-Hill.

相关案例：

见“安全压力容器”（见 6.11 节）、“用于精密仪器的低热变形材料”（见 6.16 节）、“芯片散热器”（见 6.18 节）。

6.18 芯片散热器

虽然微芯片的能耗是毫瓦级别的，但由于其体积极小，使得其功率密度非常大。随着芯片体积的逐渐减小，时钟速度的进一步提高，发热已成为不可忽视的问题。如今，个人电脑配置的奔腾芯片会发热至 85℃，必须进行强制冷却。多芯片模块（MCMs）是在一块基片上集成 130 多个芯片。按图 6.34 所示的方式，将芯片贴合在散热器上，就可以实现温度控制，但两者之间的良好接触必须予以保证。现如今散热器已经成为一个重要的零部件，是电子设备进一步发展的瓶颈。那么，怎样才能使散热效果达到最佳呢？

为避免芯片和散热器之间出现电耦合和寄生电容，散热器必须是电绝缘体，即电阻率 $\rho_e>10^{18}\mu\Omega\cdot cm$。为尽快散去芯片里的热量，材料必须有尽可能高的导热系数 λ。表 6.33 给出了相应的设计要求。另外，此处不考虑尺寸因素。

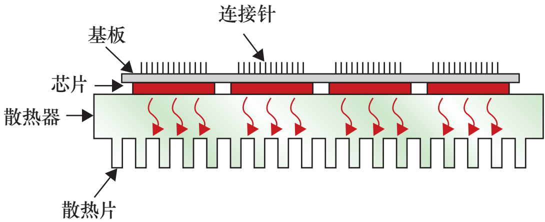


图 6.34 微电子设备的散热器（材料必须是电绝缘体，同时有尽可能好的导热性。）

表 6.33 散热器的设计要求

功能	散热器
约束条件	材料必须是好的绝缘体，或者 $\rho_e>10^{18}\mu\Omega\cdot cm$
	最大工作温度大于 150℃
	所有尺寸给定
目标	导热系数 λ 最大化
自由变量	材料选择

1. 解读

电阻率可视作为约束条件，将绝缘性不好的材料或者电阻率大于表中数值的材料筛选出来。导热性可视作目标，在满足约束的材料中，寻找导热系数 λ 值较大的材料，并以 λ 值的大小进行排序。此时，λ 变成了当前设计的材料指标。假设尺寸因素不作考虑，那么要获得最大的热通量，只剩下一个自由变量，即材料的选择。整个过程可描述为：根据电阻率筛选材料，再依据导热系数进行排序，最终选出最佳材料。

2. 选择

材料的选择过程基于图 6.35 所示的 λ-ρ_e 关系图来实现。首先，在图表中对应 $\rho_e=10^{18}\mu\Omega\cdot cm$ 处画一根竖直线，然后筛选出位于这根线右侧且 λ 值较大的材料。初步选择结果如下：AlN，Al_2O_3 或者 Si_3N_4。其中，Al_2O_3 的导热系数最大。

图 6.35 包含了所有的材料种类，因此仅能给出每一类的个别材料。本例中我们仍借助 CES 系统，属性限制条件取 $\rho_e\geqslant10^{18}\mu\Omega\cdot cm$，$\lambda\geqslant20W/(m\cdot K)$ 以及最高工作温度≥120℃。图 6.36 给出的结果肯定了先前的结论，同时有了新的发现。其他材料如 BeO、MgO 和金刚石也可以作为候选材料。金刚石的导热系数是其他候选材料的三倍以上，但成本太高，不实用。氧化铍有毒，也不合适。因此，最佳材料是氮化铝，与先前的结论一致。

3. 附言

快速检索文档，寻找“氮化铝的应用”，会发现氮化铝的典型应用主要包括：微电路、芯片载体和电子器件的基片与散热器；窗户、加热器、夹头、卡环和气体分配盘。其中特别提到了散热器，可见上述选择方法是行之有效的。

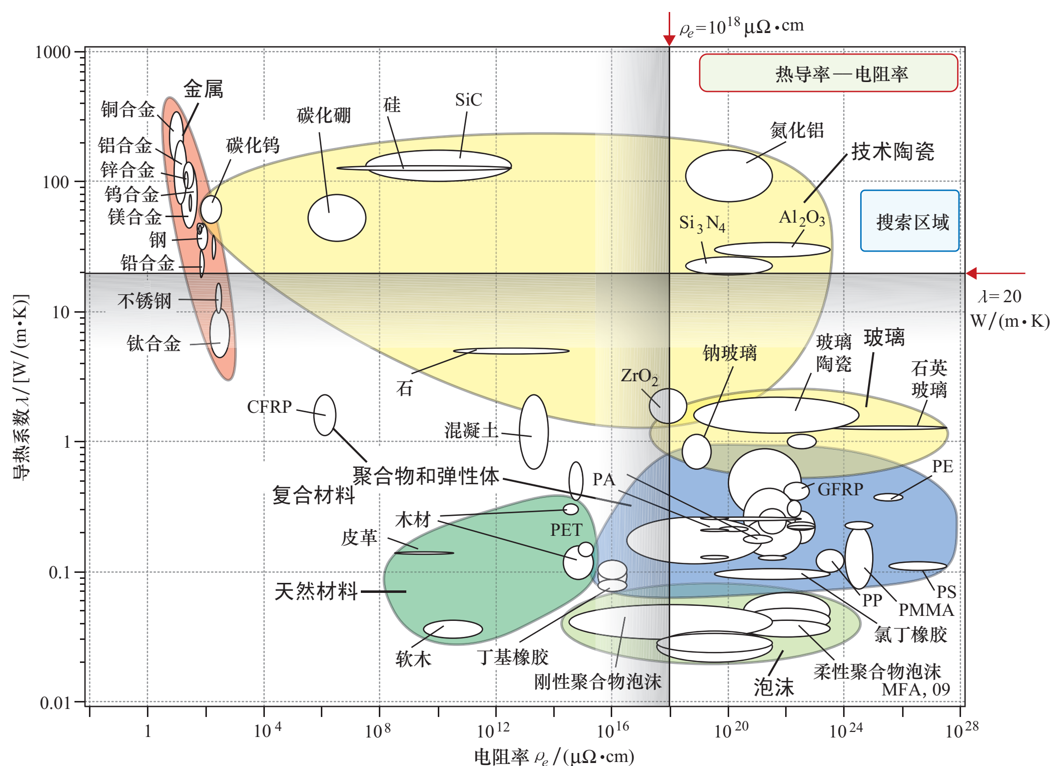


图 6.35　电阻率 ρ_e 与导热系数 λ 的关系图（图中引入了属性限制条件 $\rho_e>10^{18}\mu\Omega\cdot cm$ 和材料指标 λ。将对应 λ 的选择基准线位置提高可精炼选择结果。）

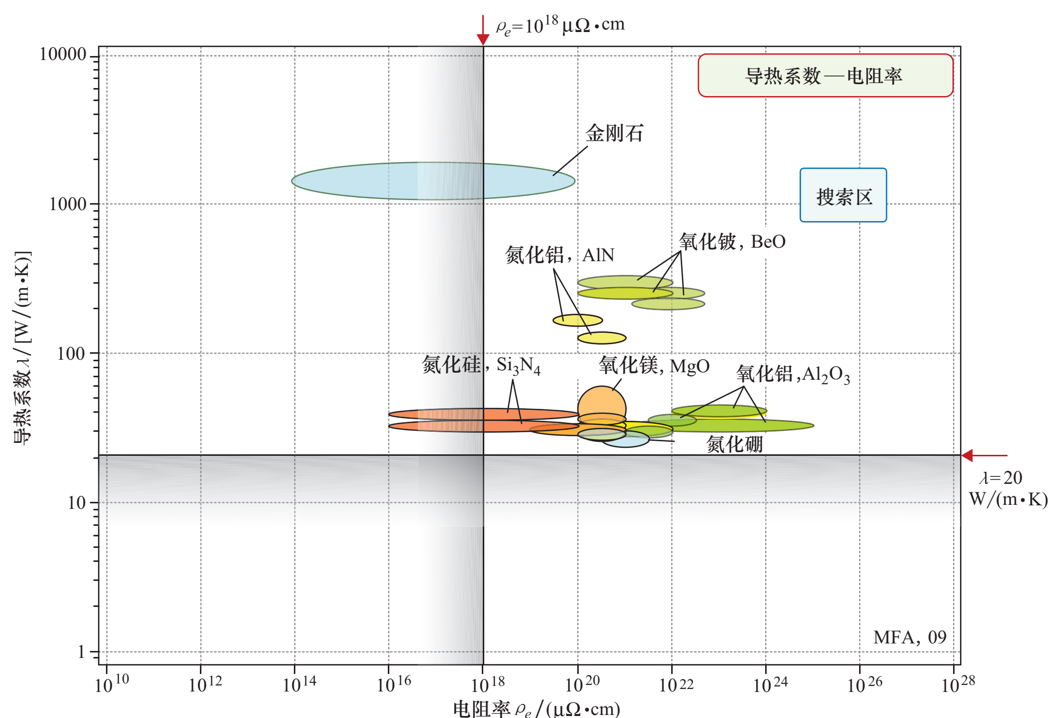


图 6.36　高分辨率的电阻率 ρ_e 与导关系图（图中引入了属性限制条件 $\rho_e>10^{18}\mu\Omega\cdot cm$ 和材料指标 λ。将对应 λ 的选择基准线位置提高可精炼选择结果。高分辨率图表可以进一步精炼选择结果。）

6.19 雷达天线罩材料

如果 BBC 想确认你是否在未付费的情况下收看电视，那么它会在你屋外停放一辆不起眼的小车，里面装有探测高频辐射的设备。这辆车看起来再普通不过，但有一点与众不同。它的外表面不是由钢板冲压而成，而是由微波透射材料构成。对于车身材料的要求，与高频信号精密太空探测器的圆形护罩材料，或船舶、飞机和宇宙飞船上用于保护雷达设备的材料的要求大致相同。那么，制作这类设备的最佳材料是什么呢？

雷达天线罩的功能是保护微波接收器不受环境因素的影响，同时也不能对电子设备性能产生影响。检测微弱信号时，即便信号通过雷达罩时只发生极小的衰减，都会降低系统的敏感性。此外，雷达天线罩必须承受结构载荷，这些载荷是由于天线罩内外压力差和超声速飞行下的高温造成的。表 6.34 给出了设计要求。

表 6.34 雷达天线罩的设计需求

功能	雷达天线罩
约束条件	承受压力差 Δp
	最高许用温度 T_{max}
目标	尽量减少微波在传输中的介电损耗
自由变量	外罩厚度 t
	材料的选择

1. 解读

图 6.37 给出了一个理想的雷达天线罩，呈半球形，由微波透射材料构成。半球的半径为 R，厚度为 t，可承受的内外压力差为 Δp。决定雷达天线罩性能的两个关键材料性能是介电常数 ε_T 和损耗角正切 $\tan\delta$。信号的损耗有两类：反射和吸收。反射的信号量与介电常数 ε_T 有关，频率越高，反射的信号量越大。空气的介电常数 ε_T 是 1，理想情况下，介电常数为 1 的雷达天线罩不会反射任何辐射物（“隐形”技术的追求目标）。

更重要的是，当信号穿过雷达天线罩表面时，吸收所造成的信号损失。频率为 f 的电磁波经过损耗角正切为 $\tan\delta_1$ 的电介质，通过厚度 dt 的功率损耗量为：

$$\left|\frac{\mathrm{d}U}{U_0}\right| = \frac{fA^2\varepsilon_0}{2}(\varepsilon_r\tan\delta)\,\mathrm{d}t \qquad (6.75)$$

式中，A 是波的电振幅；ε_0 是真空电容率。对于厚度为 t 的薄壳，单位面积的损耗为：

$$\left|\frac{\Delta U}{U_0}\right| = \frac{fA^2\varepsilon_0 t}{2}(\varepsilon_r\tan\delta) \qquad (6.76)$$

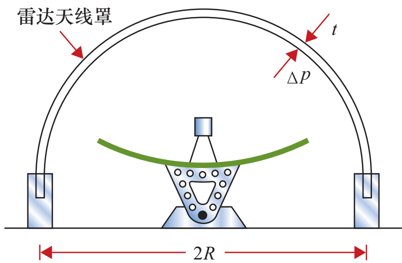


图 6.37 雷达天线罩（它必须可透射微波且能承受风荷载及压力差。）

上式就是需要最小化的值，即目标函数。厚度越小，能量损耗越小。另外，还要满足一个约束条件，即能够承受两侧的压力差 Δp。压力差导致的应力为：

$$\sigma = \frac{\Delta pR}{2t} \qquad (6.77)$$

为了能承受压力差 Δp 而不失效，式（6.77）中的应力值必须小于其材料的破坏应力 σ_f，由此可得到厚度的约束条件为：

$$t \geqslant \frac{\Delta pR}{2\sigma_f}$$

代入式（6.76）得：

$$\left|\frac{\Delta U}{U}\right| = \frac{fA^2\varepsilon_0\Delta pR}{4}\left(\frac{\varepsilon_r\tan\delta}{\sigma_f}\right) \tag{6.78}$$

因此，要使功率损耗最小，所选择的材料所对应的材料指标 M 值应最大。

$$M = \frac{\sigma_f}{\varepsilon_r\tan\delta} \tag{6.79}$$

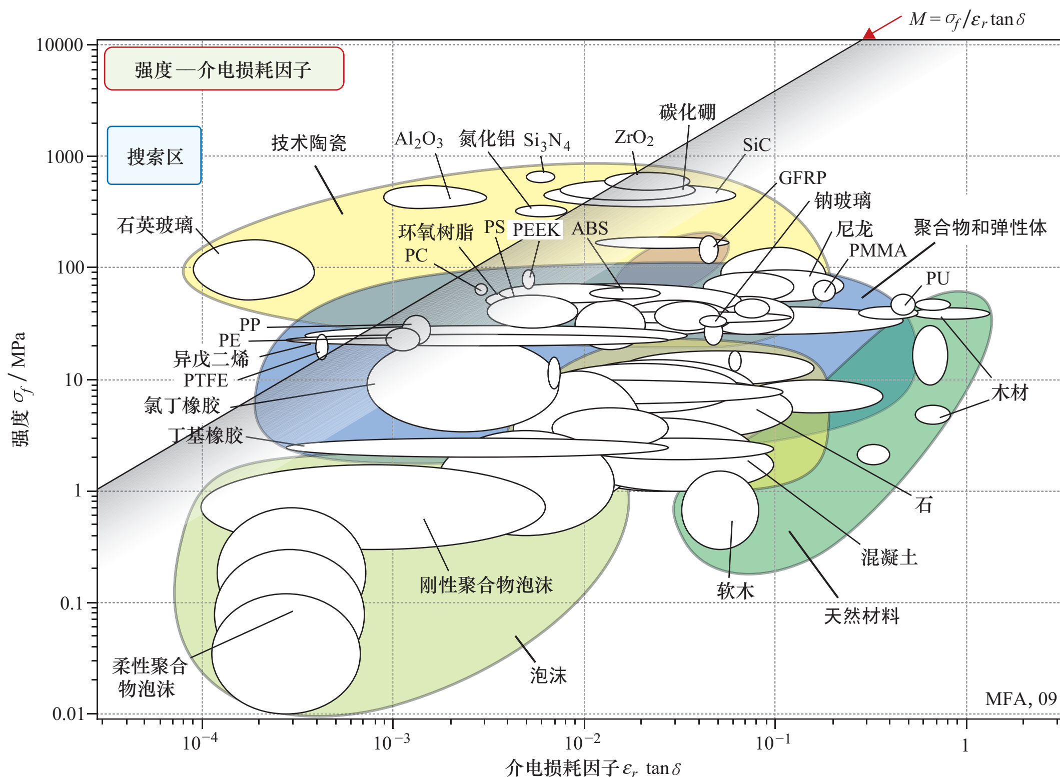


图 6.38 强度 σ_f 与介电损耗因子 $\varepsilon_r\tan\delta$ 的关系图（图中引入了对应材料指标 M 的选择基准线。）

2. 选择

基于图 6.38 所示的强度与介电损耗因子的关系图，我们可以进行初筛。聚合物有着较大的 M 值，但是强度低。部分陶瓷材料有着较大的 M 值，且在高温下很稳定。为此，需要进一步仔细查看这两类材料。图 6.39a 和 b 给出了对应的关系图，图 a 是聚合物的强度与介电损耗因子关系图，包括纯聚合物和玻璃纤维增强聚合物；图 b 是陶瓷的强度与介电损耗因子关系图。坐标轴分别对应 σ_f 和 $\varepsilon_r\tan\delta$。两个图中均引入了对应材料指标 M 的斜率为 1 的基准线。表 6.35 给出了选择结果。第一排材料为 PTFE、聚乙烯和聚丙烯，对应 M 值最大。如果要求更高的强度或良好的抗冲击性能，第二排是最佳选择。此外，当涉及高温时，第三排的陶瓷材料是最佳候选材料。

表 6.35 雷达天线罩材料

材　　料	备　　注
PTEE、聚乙烯、聚丙烯和聚苯硫醚（PPS）	介电损耗因子最小，但仅适用于室温
玻璃增强聚酯，PTFE，聚乙烯和聚丙烯，聚酰胺酰亚胺	介电损耗因子较大，但是具有较好的强度和耐热性
二氧化硅，氧化铝，氧化铍和碳化硅	适用于飞行器以及火箭等高温场合

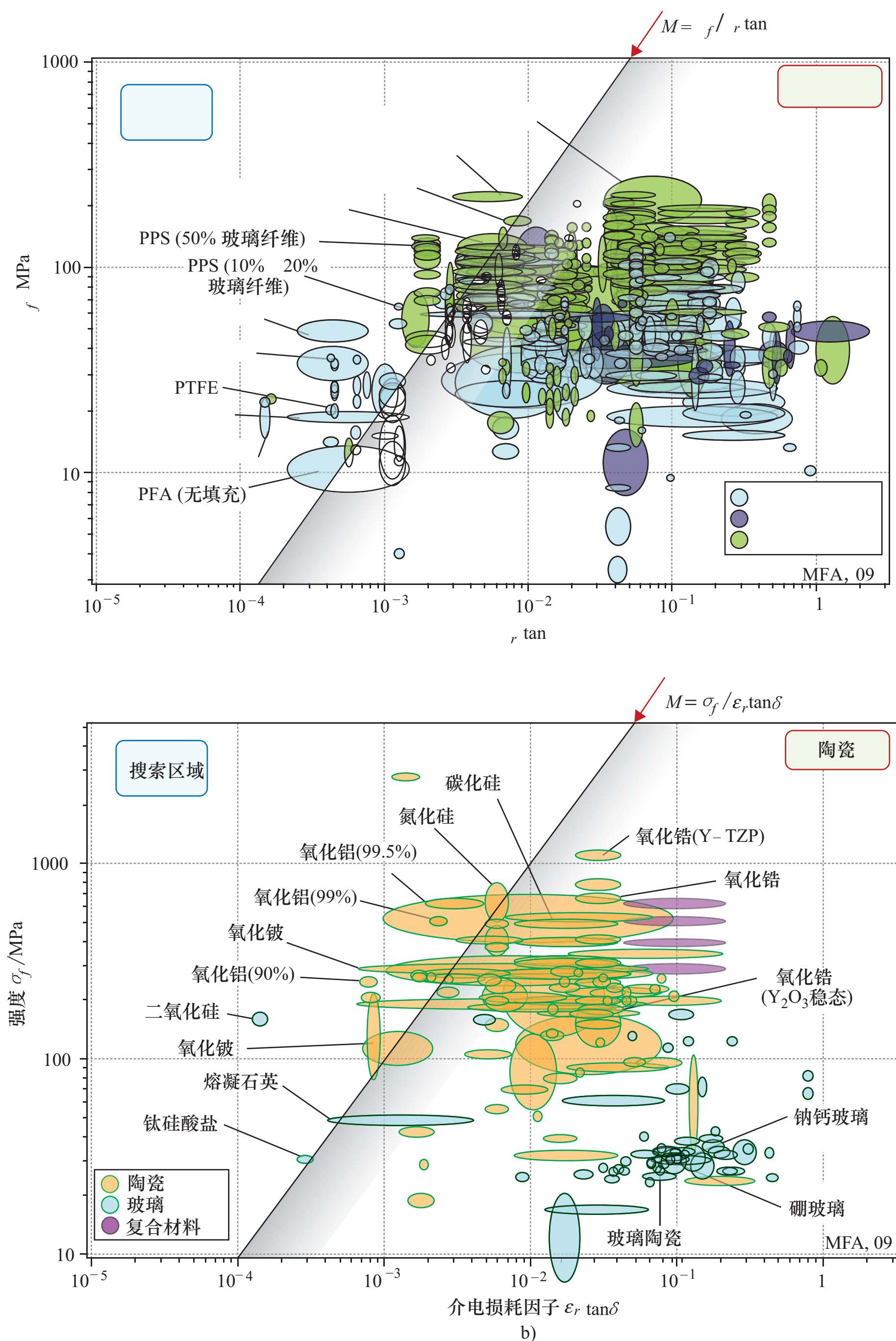


图 6.39 不同材料强度 σ_f 与介电损耗因子 $\varepsilon_r \tan\delta$ 的关系图

a）聚合物、填充聚合物以及复合材料的强度 σ_f 与介电损耗因子 $\varepsilon_r \tan\delta$ 关系图 b）陶瓷和玻璃的强度 σ_f 与介电损耗因子 $\varepsilon_r \tan\delta$ 的关系图

3. 附言

真实的雷达天线罩是由什么材料制成的呢？复合材料中，PTFE 和聚碳酸酯最常用，两者的弹性都非常好。当结构刚度有要求时（如 BBC 的厢式车），GFRP（玻璃纤维增强环氧树脂）是最佳选择，即便性能会有所损失。当性能要求居首时，玻璃纤维强化 PTFE 是首选。当外表面温度低于 300℃ 时，聚酰亚胺满足要求。超过这个温度时，就

只能选择陶瓷材料了。二氧化硅（SiO_2）、氧化铝（Al_2O_3）、氧化铍（BeO）和氮化硅（Si_3N_4）均在候选列表内。

相关阅读：

Huddleston G. K.，& Bassett，H. L.（1984）. Radomes. In R. C. Johnson，& H. Jasik（Eds.）. *Antennaengineering handbook*（2nd ed.），chapter 44. McGraw-Hill.

Lewis，C. F.（1988）. Materials keep a low profile. *Mechanical engineer*，June，37-41.

相关案例：

见“安全压力容器”（见 6.11 节）、“多约束：轻质压力容器”（见 8.2 节）。

6.20 本章小结

本章的案例旨在说明如何从最初种类繁多的材料，逐渐缩小范围至一组候选材料。大多数设计都对材料提出了必须满足的要求，比如必须能够用于温度高于 T 的环境，必须能够耐流体腐蚀等。这些限制条件使得选择范围缩小至某些材料类别，结合一些材料性能组合，我们可以进一步缩小选择范围。这些性能组合（如性能组合 $E^{1/2}/\rho$）或要求性能最大化，或要求最安全（如性能组合 K_{IC}/σ_f），或要求导热，或要求绝缘（如性能组合 $a^{1/2}/\lambda$）。再加上成本因素，综合考虑就可以筛选出候选材料子集。

最终的选择需要对材料性能、制造的难易程度、成本以及美学因素进行综合评估后才能得出。这些将在下一章中进行讨论。

6.21 扩展阅读

下面列出的文章包含详细的材料选择案例。在这些案例中，候选材料列表已给定，案例分析更多的是对列表中材料的优缺点进行讨论。这与本章的案例有所不同，本章案例的候选材料列表都是从无到有，从头选择。

1）Callister，W. D.（2003）. *Materials science and engineering，an introduction*（6th ed.）. Iohn Wiley，ISBN 0-471-13576-3.

2）Charles，J. A.，Crane，F. A. A.，& Furness，J. A. G.（1997）. *Selection and use of engineering materials*（3rd ed.）. Butterworth-Heinemann，ISBN 0-7506-3277-1.

从材料科学的角度进行材料的选择。

3）Dieter，G. E.（1999）. *Engineering design，a materials and processing approach*（3rd ed.）. McGraw-Hill，ISBN 9-780-073-66136-0.

一本受人尊敬的书籍，注重于技术设计中材料与工艺的定位。

4）Farag，M. M.（2008），*Materials and process selection for engineering design.*（2nd ed.）. CRC Press，Taylor and Francis，ISBN 9-781-420-06308-0.

从材料科学的角度进行材料的选择。

5）Lewis，G.（1990）. *Selection of engineering materials*. Prentice-Hall，ISBN 0-13-802190-2.

一本案例集，展示了很多关于工程问题的材料选择。

6）Shackelford，J. F.（2009）. *Introduction to materials science for engineers*（7th ed.）. Prentice Hall，ISBN 978-0-13-601260-3.

一本享有盛誉的材料书籍，偏向设计多一些。

第 7 章

多约束与冲突目标

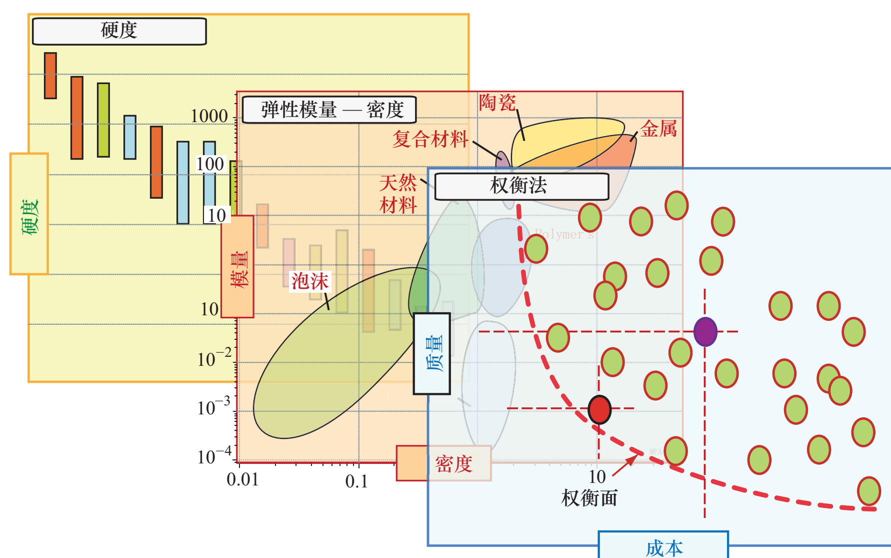


图 7.0 多约束

7.1 引言

在我们的生活中，很多决定的做出都离不开权衡。有时候权衡用于解决相互冲突的约束。例如，我有两个账单需要支付的时候，我会选择支付最紧急的那个。此外，权衡还用于平衡多个分歧较大的目标。例如，我想变得富有的同时，还想获得幸福，但二者往往不可兼得，此时就需要加以权衡。然而，金钱和幸福又无法用同一个标准来衡量。

材料及加工工艺的选择面临同样的问题。所做的选择必须满足一些相互冲突的约束条件。例如，设计飞机翼梁时，在满足刚度、疲劳强度、韧度和尺寸约束的条件下，质量必须最小化。设计一次性热饮杯时，成本是最重要的。然而成本的最小化需在满足刚度、强度和热传导要求的基础上来实现。过往的惨痛经历告诉我们，这些要求有时会被设计者所忽视。正如第 5 章所讲述的，此类问题都有一个附带多种约束条件的设计目标（质量或成本最小化）。对于这类问题，解决方案并不复杂。依次应用每个限

制条件，舍弃每一步中不符合条件的材料，剩下的就是可靠的候选材料。接着，以满足设计目标的能力对所有候选材料进行评级，再进一步查阅资料分析排名靠前的材料。该方法通常情况下是可行的，但有时也会出现一些反例，本章 7.2 节中将作详细介绍。

另一类问题涉及的往往不止一个目标，因此产生的冲突更加严重。自然界本是如此，所选择的材料往往无法同时很好地满足两个不同的目标。例如设计者在为翼梁选择一种轻质且便宜的材料时，会面临显而易见的困难。最轻的材料往往不是最便宜的，反之亦然。此时，设计者需要在质量和成本之间做出权衡。本书之前的章节内容未涉及此类问题。

有一些尽管主观但可以快速处理多约束与冲突目标的方法，如权重因子法和模糊逻辑法。这两种方法将在本章附录中进行讨论。可以说，上述方法都可以很好地解决问题，但过于依赖主观决断，这一点不容忽视。为了消除主观性，可以应用主动约束方法来消除多约束，并将冲突目标组合成单一的罚函数。这些都是标准的多目标优化工具。在使用这些优化工具前，本章要引入一个前提，即所有的目标都将被表示成需要最小化的量。没有这个前提，罚函数法将不起作用。

图 7.1 为路线图，自上而下执行。

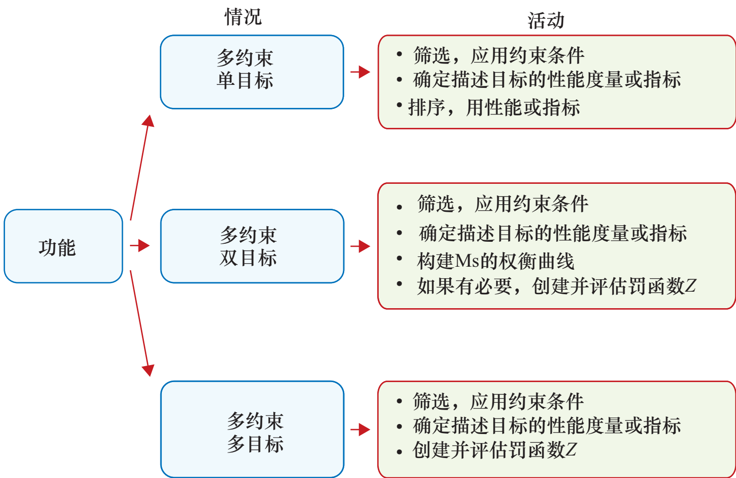


图 7.1 多约束与冲突目标情况下的材料选择策略

7.2 多约束情况下的选择

几乎所有的材料选择问题都是过约束的，即约束多于自由变量。在本书第 5 章和第 6 章中我们接触过一些多约束的问题。简单点来说，我们首先基于设计要求明确约束条件和目标，然后实施下述步骤来完成材料选择。

■筛选，依次应用每一个约束条件去除不符合要求的材料。

■排序，以描述目标的性能度量（如体积、质量或成本），或简单地以性能度量表达式中的材料指标来进行排序。

■对排名靠前的候选材料进行详细的资料分析，在此基础上做出最终的选择。

图 7.2 给出了步骤 1 和步骤 2 的示例。这两个步骤是进行材料选择的核心过程。左

侧方框描述了筛选过程，即将材料性能、设计要求（如耐蚀性）或工艺可行性作为约束来筛选材料。右侧方框给出了候选材料的成本柱状图，以此对候选材料进行排序。这些步骤实施起来都非常简单。

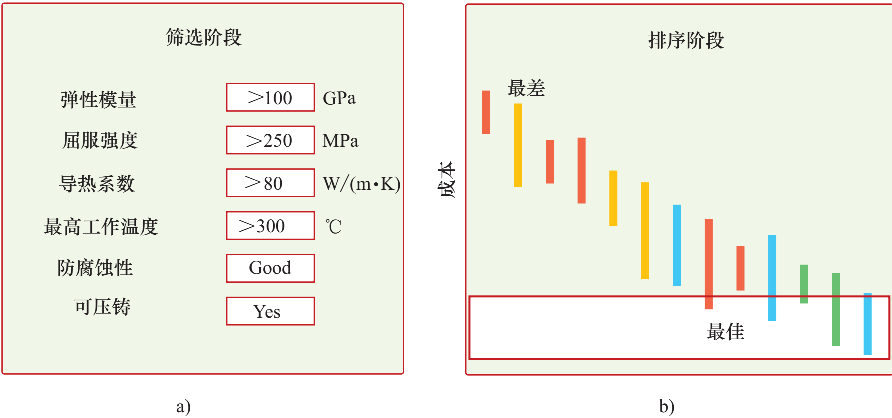


图 7.2 材料选择的核心过程（利用约束来筛选，根据目标来排序。）
a）多约束情况下的材料选择 b）单一目标情况下的材料选择

但是，材料选择的过程并非那么快捷，仍存在一些小周折，会出现单一目标受多个约束条件限制的情况。例如，对于质量最小化的拉杆设计，可能会同时有刚度和强度上的要求，导致两个相互独立的质量表达式出现。遵循第 5 章的步骤，图 7.3 描述了完整的推理过程。

如果刚度是主要约束，则杆的质量是 m_1。如果强度是主要约束，则杆的质量是 m_2 如果拉杆需要同时满足两方面的要求，则取 m_1 和 m_2 中的较大值，即：

$$\tilde{m} = \max(m_1, m_2) \tag{7.1}$$

我们的目标是找到能满足设计要求且质量 $\tilde{m}$ 最小的材料。这个例子是典型的“min-max”问题，在优化领域司空见惯。我们所寻找的最小度量值，同时又是该度量的两个或多个替代者中的最大值。

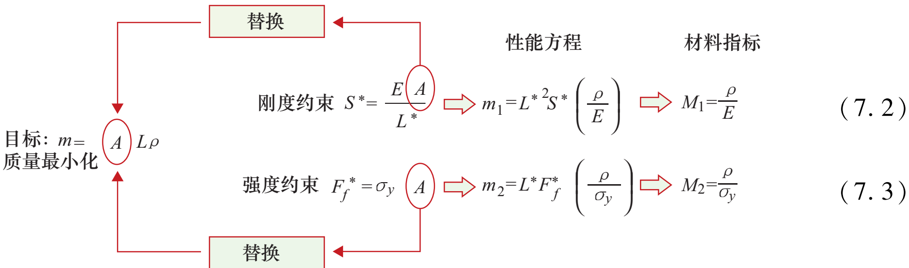


图 7.3 单一目标两约束会形成两个性能方程，对应各自的材料指标

1. 分析方法

当度量标准（本例为质量）是控制变量（图 7.3 所示两个性能方程右侧的变量）的连续函数时，有很多有效的方法可以解决“min-max”问题。但在本例中，其中一个控制变量是材料。我们要应对的是一个材料种群，每一种材料都有它独一无二的材料

性能。因此，问题是离散、非连续的。

解决该类问题的一种方法就是，针对材料组群中的每一个成员，分别评估其 m_1 和 m_2 值，将二者中的较大值赋给这种材料，然后根据该值对所有材料进行排序，在此基础上寻找最小值。下面是一个具体的例子。

多约束实例

选择轻质杆材料，其长度 L，刚度 S 和极限载荷 F_f 的具体值如下：

$$L^* = 1\text{m}, S^* = 3\times10^7\text{N/m}, \quad F_f^* = 10^5\text{N}。$$

答：将这些值与表格中给出的材料性能值代入图 7.3 中的式(7.2)和式(7.3)，得到 m_1 和 m_2 值列于表 7-1 中。最后一列显示由式（7.1）得到的 $\tilde{m}$ 值。针对上述设计要求，Ti-6-4 无疑是最好的选择，制成的杆在满足两个约束的同时质量最轻。

表 7-1 高强刚度轻质杆的材料选择

材料	$\rho/(\text{kg/m}^3)$	E/GPa	σ_y/MPa	m_1/kg	m_2/kg	$\tilde{m}$/kg
1020 钢	7850	200	320	1.12	2.45	2.45
6061 Al	2700	70	120	1.16	2.25	2.25
Ti-6-4	4400	115	950	1.15	0.46	1.15

如果将约束条件修改为：

$$L^* = 3\text{m}, \quad S^* = 10^8\text{N/m}, \quad F_f^* = 3\times10^4\text{N}。$$

选择会相应改变。此时，钢变成了最佳选择。它制成的杆满足所有约束条件且最轻。

当候选材料为 3000 种而非三种时，我们可以依靠简单的计算机代码来执行排序任务。但是，这种数值方法缺乏视觉直观性以及对创造性思维的激励，图形法则不然。接下来我们来讨论这种图形方法。

2. 图形法

针对一个材料种群，我们以 m_1 和 m_2 为坐标轴绘制图表（见图 7.4）。每一个气泡代表一种材料。式(7.2)和式(7.3)中除了材料外其余变量都是给定值，因此气泡之间唯一的区别就是材料。我们希望质量最小化，因此最佳选择位于图中左下角区域。但是，精确位置在哪里？针对刚度至上而强度不那么重要的情况，所做的选择将明显不同于与之相反的情况。对应 $m_1 = m_2$ 的直线将图形分割为两个区域。在 $m_1 \geq m_2$ 的区域，约束 1（刚度）占主导地位。在 $m_1 \leq m_2$ 的区域，约束 2（强度）占主导地位。在区域 1 内，我们的目标是 m_1 尽量小，因为 m_1 是二者中的较大值。同理，在区域 2 内，m_2 则应尽量小。这就定义了一个矩形选择包络，其角点位于 $m_1 = m_2$ 的直线上。矩形选择包络越接近左下角，$\tilde{m}$ 越小。最佳选择是留在矩形选择包络内的最后一种材料。

上述实例已清晰地解释了图形法的核心思想，不过其实施方法还可以改进。图 7.4a 以 m_1 和 m_2 为坐标轴，对应特定的 L^*，S^* 和 F_t^* 值，一旦这些值发生变化，我们就需要一个新的图表。假设我们用性能方程中的材料指标 $M_1 = \rho/E$ 和 $M_2 = \rho/\sigma_y$ 来替

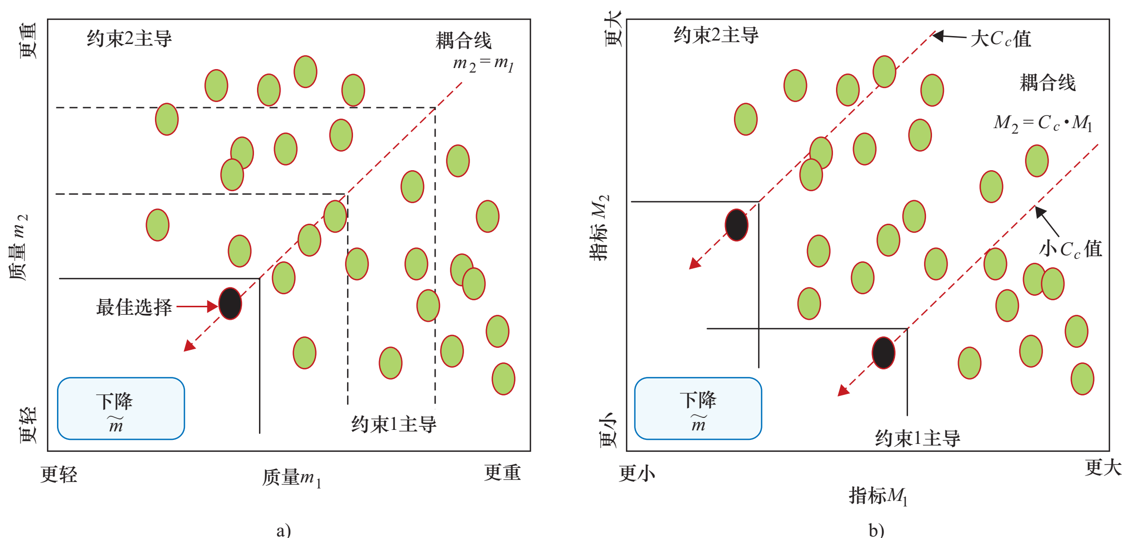


图 7.4 解决 min-max 问题的图形法

a）基于性能指标的耦合选择 b）更通用的方法：基于材料指标 M 与耦合常数 C_c 的耦合选择

代 m_1 和 m_2 作为坐标轴，绘制成图 7.4b 所示的图表。每个气泡仍代表一种材料，但气泡的位置仅与材料性能相关，与 L^*，S^* 和 F_t^* 的值无关。将 $m_1=m_2$ 代入式（7.2）和式（7.3），可得到下面的关系：

$$M_2=\left(\frac{L^* S^*}{F_f^*}\right)M_1 \tag{7.4}$$

或可表示成对数关系：

$$\lg M_2=\lg M_1+\lg\left(\frac{L^* S^*}{F_f^*}\right) \tag{7.5}$$

上式描述了一条斜率为 1，位置随 $L^* S^* / F_f^*$ 值变化的直线。这条线我们称之为耦合线，$L^* S^* / F_f^*$ 为耦合常数，记作 C_c。选择策略还是一样：拖动角点位于耦合线上的矩形选择包络沿着耦合线向左下角移动。当前图表的通用性更好，涵盖了所有的 L^*，S^* 和 F_f^* 值。改变它们中任意一个的值，或者零件的几何尺寸（本例中可用 L^* 来描述）都会改变耦合线的位置，并影响材料选择的结果。

第 8 章将给出相应的案例分析。

7.3 冲突目标

现实生活中面临的材料选择问题，几乎都需要在冲突目标间达成某种妥协。最常见的有以下三种：

■质量最小化——对于移动装置、振动装置或有限力快速响应装置（如航空航天和地面运输系统）的设计，这是一个常见目标。

■体积最小化——节约材料，同时空间日益珍贵（试想一下越来越薄、越来越小的手机、便携式电脑和 MP3 播放器等的驱动器，以及在有限空间内装入尽可能多功能的需求）。

■成本最小化——利润取决于成本与价值的差额（本书第 13 章和第 16 章将阐述相关内容）。提高利润最直接的方法就是降低成本。

如今，我们有必要增加第四个目标：

■环境影响最小化——降低由材料生产、产品制造和产品应用导致的环境破坏（详见第 15 章）。

当然，还有很多用于某些特定应用的目标，其中一些只是上述四种目标的不同表述方式。例如，比功率最大化就可以表述成另一种方式，即给定输出功率的情况下使质量最小化。弹簧、电池或飞轮的储能最大化可描述成在给定储能的情况下使体积最小化。有些目标可用工程术语进行量化，比如可靠性最大化（可描述成以最小的成本达到一定的耐磨性或耐蚀性）。然而，有些目标则不能，比如顾客吸引力最大化——它是性能、风格、外观和市场营销的综合体。

对于上述任意一个目标，我们都可以用一个性能度量 P_i 来描述。几乎所有的产品设计都会至少涉及两个目标。这很容易引发冲突，因为能很好满足其中某个目标的选择，往往无法同样满足其他的目标。最好的选择是在各个目标间达成一种平衡，不对任意一个目标进行最优化，而是在相互依存的基础上同步优化，达到最佳。由此，核心问题就会暴露出来。成本与质量如何比较？体积与环境影响又该如何比较？不同于图 7.3 所示的性能方程，此处的每个目标所用的衡量单位不同，无法相容。因此，需要新的方法来解决这个问题，后续我们将会加以讨论。首先，我们来给出一些定义。

1. 权衡策略

在考虑成本最小化（性能度量 P_1）以及质量最小化（性能度量 P_2）的同时，材料的选择仍需满足一系列约束，如所需的最大工作温度或特定环境下的耐蚀性。按照优化理论的标准术语，一种同时满足所有约束，但任一目标并未强制最优的解决方案可视为可靠的材料选择。图 7.5 给出了一些候选方案，以 P_1 和 P_2 为轴，图中每一个气泡代表一种方案。其中，能将 P_1 最小化的方案并不一定能使 P_2 最小化，反之亦然。某些方案，如 A 处气泡所对应的方案，远没有达到最优。以 A 为角点的矩形框内的方案，其 P_1 和 P_2 值均较小。也就是说方案 A，会受其他方案的支配。而对于方案 B 来说，它的 P_1 和 P_2 值已经最小，因此可称为非支配解。这类解所位于的线或面可称为非支配面或最佳权衡面。与非支配解对应的 P_1 和 P_2 的集合被称为 Pareto 集。

有三种策略可用于作进一步的决策。位于权衡面或其附近的方案能达到最佳平衡，剩下的方案均可以舍弃。通常情况下，这已足够我们列出一份清单，并根据直觉来排序，然后找到相关的文档（策略 1）。或者采用策略 2，将某一目标改写为一种约束。如图 7.6 所示，给成本设置一个上限，这样使另一个约束最小化的方案就显而易见了。但是，这并非是真正的优化。为实现真正的优化，我们需借助策略 3，即罚函数。

2. 罚函数

权衡面确定了一个能在各目标之间达到最佳权衡的方案子集。然而，最终的方案只需要一个。对此，方法一就是将众多不同的目标集合成一个目标函数，使得函数值最小的方案就是最合适的。因此，可以定义一个局部线性罚函数 Z：

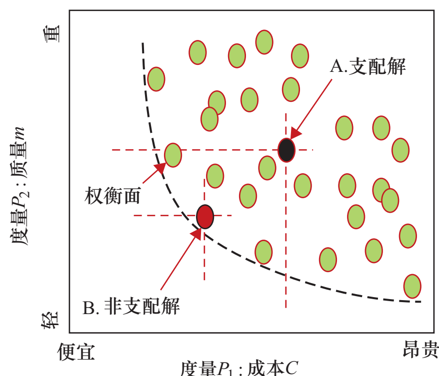


图 7.5 多目标：寻求能同时使质量和成本最小化的材料（每一个气泡代表一个能满足所有约束的方案。权衡面与非支配解相关联。）

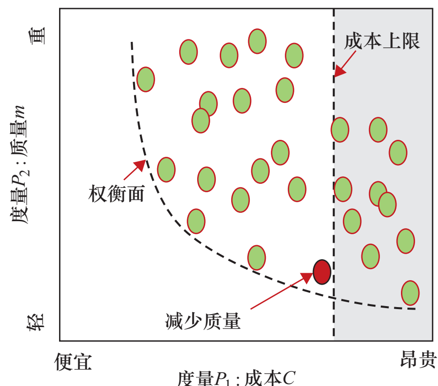


图 7.6 标注成本约束的权衡图（图中，使得质量最小的方案显而易见，但它并非真正的最优解。）

$$Z=\alpha_1 P_1+\alpha_2 P_2+\alpha_3 P_3 \cdots \tag{7.6}$$

最佳选择是 Z 值最小的材料。α_i 称为交换常数（又称为功能常数或比例常数），将性能度量的单位转换为 Z 的单位，而 Z 的单位通常是货币单位。交换常数的定义为：

$$\alpha_i=\left(\frac{\partial Z}{\partial P_i}\right)_{P_j, j \neq i} \tag{7.7}$$

交换常数是指在保持其他变量不变的情况下，给定性能度量的单位增量所引起的罚函数增量。例如，如性能度量 P_2 代表质量 m，α_2 就是 m 的单位增量引起的 Z 的改变量。

成本 C 是常用的最小化目标之一。取 $P_1=C$，这样 Z 就可以直接用 C 的货币单位来衡量。此时，C 的单位变化会导致 Z 的单位变化，即 $\alpha_1=1$。由此，式（7.6）可写为：

$$Z=C+\alpha_2 P_2+\alpha_3 P_3 \cdots \tag{7.8}$$

回到之前的例子，$P_1=C$（成本）且 $P_2=m$（质量），因此上式可写为：

$$Z=C+\alpha m \tag{7.9}$$

或

$$m=-\frac{1}{\alpha} C+\frac{1}{\alpha} Z \tag{7.10}$$

此时，α 就是 m 的单位增量所对应的 Z 的改变量。式(7.10)定义了 m 和 C 之间的线性关系，在图 7.7a 中显示为一组平行罚函数线，其中每一条对应一个 Z 值。直线的斜率是交换常数的倒数$-1/\alpha$。Z 值沿左下角依次减小，即最佳选择位于左下角。最佳方案位于罚函数线与权衡面的切点附近，因为此处 Z 值最小。在现阶段就将候选方案收窄至一项是不明智的，因为我们尚不知道详细的文档查阅会反映出哪些问题。因此，我们将切点附近的方案作为候选子集。

通常情况下，大多数材料选择图表都采用对数坐标绘制，其中缘由可参阅第 4 章。对数坐标的引入，使得线性关系变成了曲线关系，如图 7.7b 所示。但处理方法是一致的，最佳选择依然位于切点附近的区域。

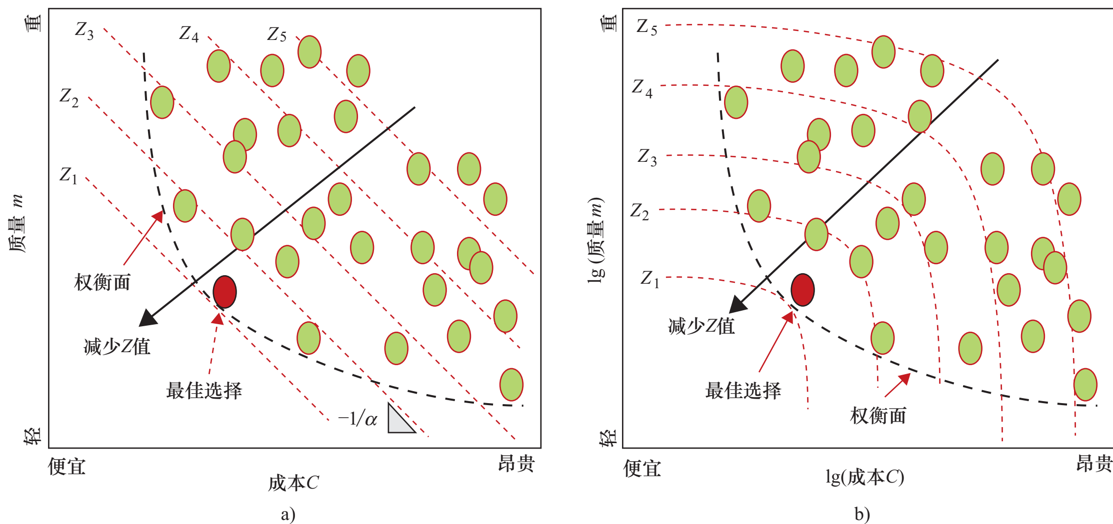


图 7.7 一组平行罚函数线

a）叠加罚函数 Z 的权衡图（等高线的斜率为 $-1/\alpha$，与权衡面相切的等高线可用于确定最佳方案。） b）使用对数刻度作图（原来的线性关系呈曲线关系。）

罚函数的应用

轻型货车质量的交换常数 $\alpha=12\$/\mathrm{kg}$，意味着货车质量每减少 1kg，在整个货车使用过程中将会节省 12\$。汽车制造商提供三种模式：第一种模式车体采用钢板；第二种模式车体采用铝合金，相对第一种多花了 2500\$，但质量减轻了 300kg；第三种模式采用碳纤维面板，相对第一种多花了 8000\$，但是质量减轻了 500kg。哪一种是最好的选择呢？

答：钢和铝合金汽车的罚函数分别如下

$$Z_1=C_1+\alpha m_1 \quad \text{和} \quad Z_2=C_2+\alpha m_2$$

只要铝合金汽车的 Z_2 比钢板汽车的 Z_1 小，则铝合金汽车将更有吸引力。将上面右式减去左式，得：

$$\Delta Z=Z_2-Z_1=C_2-C_1+\alpha(m_2-m_1)=2500-12\times300=-1100$$

铝合金板汽车在整个生命周期中将会节省 1100\$，所以铝合金是一个更好的选择。重复上述步骤，比较复合材料板汽车和钢板汽车，结果显示复合材料板汽车会多花 2000\$，因此这不是一个好的选择。

3. 相对罚函数

通常，针对已经存在的应用，将新的材料选择与现有材料进行对比，有助于我们找到更好的材料。为此，我们定义了一个相对罚函数：

$$Z^*=\frac{C}{C_o}+\alpha^*\frac{m}{m_o} \tag{7.11}$$

式中，角标“o”指的是现有材料性能；Z^* 和 α^* 上的星号表示二者都是无量纲的数值。相对交换常数 α^* 表征的是给定性能增益引起的价值增益。因此当 Z 固定时，$\alpha^*=1$意味着：

$$\frac{\Delta C}{C_o}=-\frac{\Delta m}{m_o} \tag{7.12}$$

即质量减半意味着成本加倍。

图 7.8 给出了相对权衡图，采用线性关系表示，两个轴分别是 C/C_o 和 m/m_o。当前所使用的材料对应坐标（1，1）。区域 A 内的解决方案比现有方案所采用的材料质量更轻、成本更低；区域 B 内的方案采用的材料则比现有材料成本低，但质量较大；区域 C 内的方案则比现有材料质量更轻，但成本较高；区域 D 内的方案则毫无可取之处。如图 7.8 所示，在图上绘制 Z^* 的等高线，与相对权衡面相切的等高线进一步明确了最佳搜寻区域。如前所述，当采用对数值坐标绘图时，Z^* 的等高线则变成了曲线。第8 章的案例学习将会用到相对罚函数。

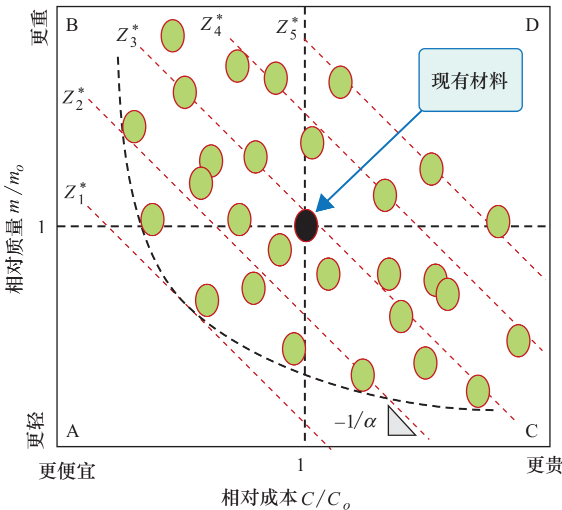


图 7.8 相对权衡图（当为了减少质量或者成本，或者二者兼有时，我们采用一种材料来代替现有材料，相对权衡图会非常有用。现有材料的坐标为（1，1），因此在 A 区域的材料既轻且便宜。）

如果交换常数值是已知的，那么完全的系统性选择是可能的。但是，那只是一种假设，接下来来讨论这个话题。

4. 交换常数 α

交换常数是性能度量在单位增量下的罚值，或更通俗地讲，性能度量单位减少量的效用，其值的大小和符号取决于具体应用。例如，轻量化的意义重大，但轻量化的效用在家庭用车上很小，而在航空器上则大得多。房屋保温层的传热效用直接关系到房屋供暖成本的高低；但在电传热器上，传热效用越高，电器性能越好。效用是真实的，意味着它能衡量节省的成本；但有时也是主观的，意味着消费者可能会受到供给、广告或潮流等因素的影响，从而支出比真实价值更多或更少的价格。

对于许多工程应用，交换常数可以由系统的生命周期总费用模型得出。因此，运载系统的轻量化效用源于系统全生命周期内的能源节约或者有效载荷的增加所带来的价值。表 7.2 给出了 α 的一些近似值，其中最令人注目的是表中数据极大的范围。交换常数主要取决于材料的具体应用，这就是尽管铝合金在航天方面得到普遍应用，但在汽车上很难应用，钛合金在军用航空领域的应用远大于民用航空领域，以及铍在空间飞行器上应用受限的原因所在。

表 7.2 运载系统的质量—成本交换常数 α

领域：运载系统	评价基础	交换常数 α/($/kg)
家用车	节能	1~2
货车	有效荷载	5~20
民用飞机	有效荷载	100~500
军用飞机	有效荷载，性能	500~1000
航天器	有效荷载	3000~10000

交换常数能够以多种方式估算得到。太空发射的成本大约为每千克 3000 美元到 10000 美元。发射结构的质量每减少 1kg 可以使有效荷载得以相应的增加，由此可得出表中 α 值的范围。基于有效荷载增加或能源消耗减少等类似的理论，同样可以得出用于民航、货车和汽车的交换常数值。交换常数值随时间变化，可以反映出能源成本和立法提高能源经济性等诸如此类的种种变化。特殊环境对交换常数值有着显著的影响，例如喷气式发动机制造商为确保他们所生产的发动机的额定功率重量比，假如减重是唯一办法的话，他们可能愿意为减重 1kg 支付 1000 多美元。或者从惩罚角度来说的话，如果不能实现额定的功率重量比，他们会因此被罚每千克 1000 美元。

上述交换常数值都是基于工程标准得出的。对于那些基于主观价值得来的交换常数则很难评估。对于自行车质量/成本的权衡就是一个典型的例子。对爱好者来说，自行车越轻越好。图 7.9 就显示了骑友如何看待自行车的轻量化。该图是自行车的质量与成本权衡图，原始数据来源于自行车杂志。权衡线上任一点的切线给出了一个交换常数值，从每千克 20 美元到 2000 美元，主要取决于自行车的质量。对于一个普通的自行车用户来说，可以通过减肥，从而不花一美分将整个系统（他和自行车）进行减重，他还愿意花费 2000 美元来为自行车减重 1kg 吗？还是有可能的，这是一种感知价值。广告的目标之一就是提高产品的感知价值，从而在不增加成本的情况下增加它的价值。感知价值会影响家用车的交换常数，同时也是将钛合金应用于手表、将碳纤维应用于玻璃框架，以及将特殊材料应用于运动器材中的重要原因。对于这类情况，α 值很难确定下来。

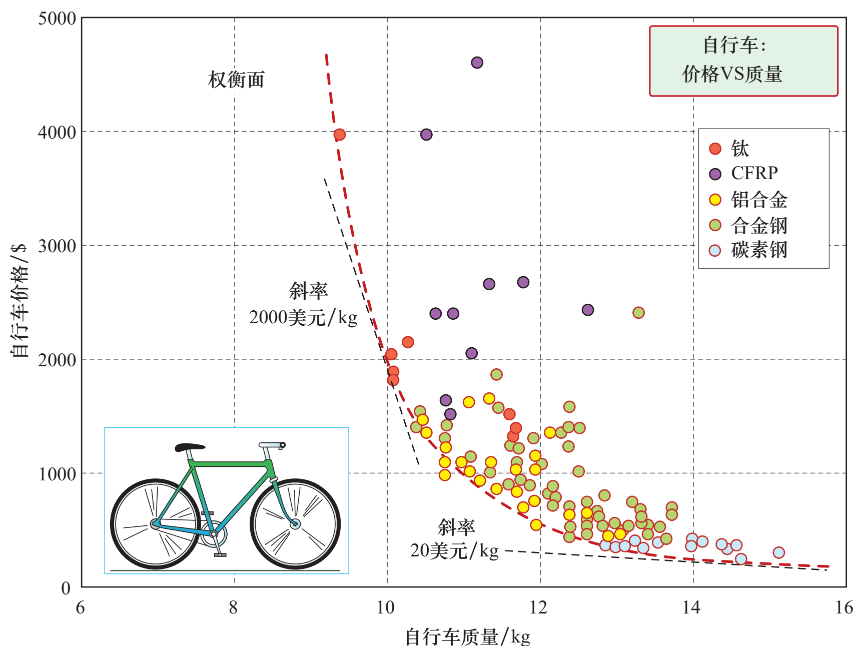


图 7.9　自行车价格—质量的权衡图（数据来源于自行车杂志。不同的自行车框架材料，对应图中不同的方案颜色。权衡面上任意点的切线斜率给出了交换常数的估计值。该值取决于具体应用。当顾客仅需要一辆便宜自行车用于购物时，轻量化的效用就很低（约 20$/kg）。但是，对于一个看重性能的自行车运动爱好者来说，轻量化的效用就很高（约为 2000$/kg）。）

在某些特定情况之下，交换常数的确立是非常困难的。一个重要的例子就是环境影响——由产品的生产、使用与销毁对环境所造成的损害。如今，尽可能降低对环境的影响已成为一个重要的目标，可以与成本最小化目标相提并论。高明的设计能够在不大幅增加成本的前提下尽量减少对环境的影响。但是降低生态影响的价值如何呢？除非约定或实施一个交换常数，否则设计者根本无法回答。

然而事情并非那么困难。即便在无法精确知晓交换常数的情况下，我们也可以做出有效的工程决策。相关内容将在下一节进行详述。

5. 交换常数是如何影响材料选择的？

材料选择搜索空间的离散性，意味着权衡面上某个给定方案是一定 α 范围内的最佳选择，但在该范围外另一个方案可能才是最佳选择。通常这个范围会很大，所以在此范围内的任意交换常数值都指向同一种材料选择（见图 7.10）。为方便起见，图中的方案作了移动从而使其中的三个方案成为潜在的最优化方案。当 $\alpha \leqslant 0.1$（或 $1/\alpha \geqslant 10$）时，方案 A 是最佳选择；当 $0.1<\alpha<10$ 时，方案 B 是最佳选择；当 $\alpha \geqslant 10$ 时，方案 C 是最佳选择。这些信息很容易从右边的柱状图中读出，α 的范围被最佳方案的转换点细分成几部分，每部分都标记着所对应的最佳方案。

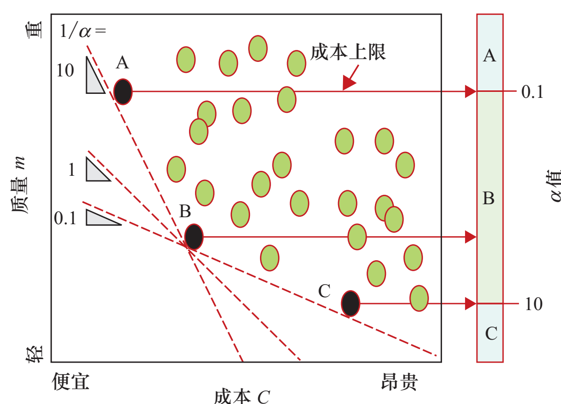


图 7.10 通常情况下，某一材料（或某一材料子集）会是较大交换常数范围内的最佳选择（因此，近似的交换常数足以做出精确的材料选择。）

7.4 本章小结

材料指标方法是在满足一系列简单约束的前提下，利用单一目标的最小化来进行材料的选择。这种方法听上去很简单，过程很清晰。然而，事情远没有想象得这么简单。不同的性能度量之间会出现冲突，因此必须在其中找到平衡点。

借助判断能力，我们可以针对这些约束与目标进行重要度排序。本章 7.6 节中描述的权重因子法或模糊逻辑法可以使得判断立足于更为客观的基础上，但同时也导致其结果不明显。如果可以，我们应尽可能用分析来代替判断。对于多约束，要明确主动约束并基于主动约束进行设计。首先推导出耦合材料指标的方程，然后在材料选择图上构建这些材料指标，就可以确定出满足所有约束且性能最好的材料子集。多目标需要借助于惩罚函数 Z，通常包含一个或多个交换常数 α，使得所有的目标以同一单位

(通常是成本) 来表示。这样，将 Z 最小化就可以确定最佳选择。

当涉及多约束或多目标时，最佳的材料选择并没有那么显而易见。这时候，上述方法就有了用武之地。第 8 章我们将给出几个例子。

7.5 附录：权重因子和模糊方法

假设你需要这样一个零部件，在满足所需刚度（约束 1）和强度（约束 2）的同时，还要尽可能轻（一个目标）。选择材料的过程可以如下：首先从所有材料中选出高弹性模量 E 的材料子集，以满足刚度要求；然后从中选出弹性强度极限 σ_y 高的材料子集，以满足强度要求；最后从中选出密度低的材料子集，以满足质量要求。类似的，假如我们需要一种足够刚度（一个约束）的材料，同时要尽可能轻（目标 1）和便宜(目标 2)。那么，借助同样的方法，我们根据约束找到质量轻的材料子集，然后在这个材料子集中进一步找出价格便宜的材料子集。有些选择系统是基于这样的工作原理，但这并不是一个好的方法，因为在决定刚度、强度、质量和成本的相对重要性时，缺乏有效的指导原则。这一点不可忽视。正是因为相对重要性的缘故，铝合金才成为航空领域的基本结构材料，而钢成为陆上结构的主要材料。

相对重要性是一个由来已久的问题，工程师们至少在一个世纪前就开始寻求解决方法。传统的方法是为每一个约束和目标分配权重因子，用来指导选择。它的优点是有经验的工程师能够很好地评估相对权重，而缺点是过于依赖个人判断。在评估权重时，随着判断的不同，会出现一些微妙的情况。接下来我们会针对其中的一个问题加以讨论。正因为上述原因，本章主要讨论系统方法。但是，传统方法目前仍在广泛应用，因而我们也需要加以了解。

1. 权重因子法

权重因子试图量化判断，其工作原理如下：明确关键性能或指标，并将对应潜在候选材料的指标 M_i 值列于表格中。由于这些指标绝对值变化范围很大，且取决于所选择的度量单位，因此需要借助于定标方法。即，将每个指标除以该指标对应的最大值 $(M_i)_{max}$，由此得到的最大值为 1。然后将正则化后的指标分别乘以一个权重因子 w_i，代表该指标对于部件性能的相对重要性，其值介于 0~1。这样，我们就得到了加权后的指标 W_i：

$$W_i = w_i \frac{M_i}{(M_i)_{max}} \qquad (7.13)$$

对于无法用数值来表示的性能，如焊接性和耐磨性，可以用 A 到 E 来划分等级，——如 A=5(非常好) 到 E=1(很糟糕) ——然后除以最高等级分。对于如腐蚀率这种需最小化的性能，应采用最小值 $(M_i)_{min}$ 来进行定标，具体形式如下：

$$W_i = w_i \frac{(M_i)_{min}}{M_i} \qquad (7.14)$$

所选的权重因子之和为 1，因此 $w_i<1$，$\sum w_i=1$。分配权重因子的方法有很多（参阅 7.5 节），但是都不同程度地依赖于个人判断。被判断为最重要的性能赋以最大的 w，第二重要的性能次之，依此类推。加权后的指标 W_i 可由式（7.13）和式（7.14）计算得到。最好的选择就是对应式（7.15）中 W 值最大的材料：

$$W = \sum_i W_i \tag{7.15}$$

这个看起来很简单，其实存在很多问题，有些很明显，有些则不然。下面我们将给出一个例子。

选择一种材料来制作轻质（密度低）高强（弹性强度极限高）的零部件。表 7.2 给出了四种候选材料的性能值。依据我们的判定，本例中质量比强度更重要，所以我们将权重因子分配如下：

$$质量:w_1 = 0.75$$

$$强度:w_2 = 0.25$$

通过式（7.13）和式（7.14）我们将指标规范化，并通过式（7.15）求和得到 W。由表 7.3 的倒数第二列可知，铍是最佳选择，其次分别是 Ti-6Al-4V 和 6061Al。由于铍价格昂贵且有毒，假如我们略去这个选项只剩前三种材料，将会出现什么情况呢？用同样的方法得出 W 值，列于表格的最后一列。此时，6061Al 会是最佳选择，其次是 Ti-6Al-4V。也就是说，移除其中一种材料会颠覆剩余材料的排名。由此可见，即便可以精确地选取权重因子，所得结果对候选材料子集的依赖性也不会有所改善。因此，该方法本质上存在不稳定性，对于不相干选择十分敏感。

表 7.3 举例说明权重因子

材　　料	ρ/(Mg/m³)	σ_y/MPa	W(含铍)	W(不含铍)
1020 钢	7.85	320	0.27	0.34
6061 Al(T4)	2.7	120	0.55	0.78
Ti-6Al-4V	4.4	950	0.57	0.71
铍	1.86	170	0.79	

2. 模糊逻辑

模糊逻辑将权重因子向前推进了一步。图 7.11 左上部分显示了某种材料的性能值 R 在指定范围内的概率 $P(R)$。对于图中 A、B、C 和 D 四种材料而言，每种材料的性能值范围界限清楚。引用该领域的术语，这些值是清晰的。右上部分的选择标准给出了性能值 R 的范围，这个标准是模糊的。换句话说，这个选择标准定义了一个中心，该中心定义了性能的理想取值范围。同时，选择标准具有较宽的基底，将范围拓宽以包含边界区域。边界区域的性能值虽然也是可允许的，但越接近边缘，可接受性就越低。基于上述方法，可获知所做选择的可接受性 $S(R)$。

将上述两张图叠加在一起，可构成图 7.11 的左下部分。该图代表单一选择阶段，可根据 $P(R)$ 和 $S(R)$ 的乘积确定材料的可取性。由图可知，材料 B 是完全可接受的，因而权重因子取 1；材料 A 虽然可接受，但权重因子稍低一些，这里取 0.5；材料 C 也是可接受的，权重因子约为 0.25；材料 D 是不可接受的，因而权重因子为 0。第一阶段选择结束后，数据库中每种材料有一与之对应的权重因子。在后续阶段中，基于其他约束或目标得到的指标，不断重复上述过程。将每种材料的权重因子采用例如相乘的方法聚集起来，给每一种材料赋予一个介于 0 和 1 之间的超级权重。通过材料性能或指标边界的模糊化（见图 7.11 右下部分），以及选择标准的模糊化，该方法可以进一步改良。尽管确定选择中心和基底位置的技术已经很精致，但基本问题依然存在，即 $S(R)$ 范围的选择依赖个人判断。

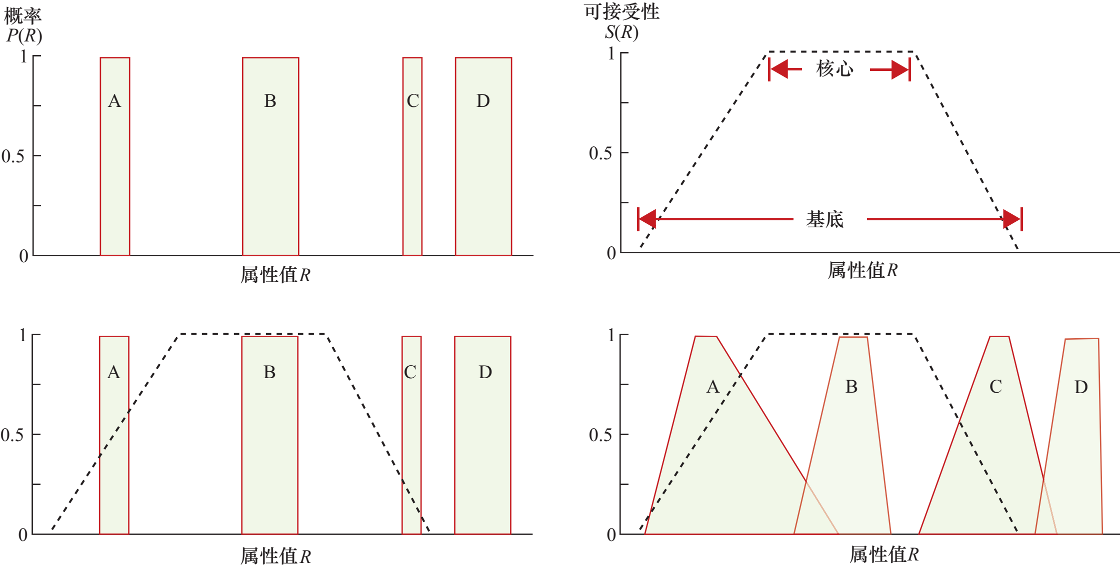


图 7.11 模糊选择法（将明确定义的性能和模糊选择标准结合起来，为每种材料分配权重因子。这样，性能本身也就有了模糊的范围。）

当缜密的分析不再适用的时候，权重因子和模糊方法的优势就会显现出来。它们可用于选择的第一阶段。但是，假如想真正为一个复杂设计确定最理想的材料，建议采用本章 7.2 节和 7.3 节所述的方法。

7.6 扩展阅读

1）Ashby，M. F.（2002）. Multi-objective optimization in material design and selection. *Acta Mater*，48. 359-369.

使用权衡面和效用函数来进行材料选择的研究性文章。

2）Bader，M. G.（1977）. Composites applications and design. In. *Proc ICCM*-11，*Gold Coast*，*Australia Vol*. 1. ICCM：London.

利用权衡方法进行复合材料体系选择的案例。

3）Bourell，D. L.（1997）. Decision matrices in materials selection. In G. E. Dieter（Ed.），*ASM Handbook*，Vol. 20. *Materials selection and design*（pp. 291-296）. ASM International，ISBN 0-87170-386-6291-296.

关于权重因子和决策矩阵使用的介绍。

4）Clark，J. P.，Roth，R.，& Field，F. R.（1997）. Techno-economic issues in material science. In G. E. Dieter（Ed.），*ASM Handbook*，Vol. 20. *Materials selection and design*（pp. 255-265）. ASM International，ISBN 0-87170-386.

作者对材料选择中的成本和效用分析，以及环境问题进行了研究。

5）Dieter，G. E.（2000）. *Engineering design—A materials and processing approach*（3rd ed.）. 150-153，255-257. McGraw-Hill，ISBN 0-07-366136-8.

一本受人尊敬的书籍，现在是第 3 版，注重于技术设计中材料与工艺的定位。

6）Field，F. R.，& de Neufville，R.（1988）. Material selection—maximizing overall utility，*Metals and Materials*，Iune，378-382.

关于效用分析的总结，面向汽车工业中的材料选择问题。

7）Goicoechea，A.，Hansen，D. R.，& Duckstein，L.（1982）. *Multi-objective decision analysis with engineering and business applications*. Wiley，ISBN 0-4710-64017.

关于多目标决策理论的启蒙书籍。

8）Keeney，R. L.，& Raiffa，H.（1993）. *Decisions with multiple objectives：preferences and value trade-offs*（2nd ed.）. Cambridge University Press，ISBN 0-521-43883-7.

一本非常易读的书籍，介绍了多目标竞争决策方法。

9）Papalambros，P. Y.，& Wilde，D. J.（2000）. *Principles of optimal design*，*modeling and computation*（2nd ed.）. Cambridge University Press，ISBN 0-521-62727-3.

关于工程优化设计方法的介绍。

10）Pareto，V.（1906）. Manuale di economica politica. Societa Editrice Libraria，Milano，Italy. Translated into English by Schwier，A. S.（1971）as *Manual of Political Economics*，Macmillan.

一本被大量引用但很少被阅读的书籍。是利用权衡面方法解决多目标问题这个概念的出处。

11）Sawaragi，Y.，Nakayama，H.，& Tanino，T.（1985）. *Theory of multi-objective optimization*. Academic Press，ISBN 0-12-620370-9.

特别详细的关于多目标优化的书籍。非常详尽但不适合作为启蒙书籍。

第 8 章

案例分析：多约束与冲突目标



图 8.0　制动盘和卡钳

8.1　引言

本章案例阐述了第 7 章所述技术的工作原理。为避免不必要的细节使得阐述过程难以理解，这些案例都做了简化。此处的简化并没有像首次出现时那么重要，因为材料选择主要由问题的原理决定，而非几何尺寸的细节。即便诸多细节被移除，工作原理仍可以保持一致，因此材料选择相对于此是独立的。第 7 章提出的方法有广泛的用途，在本章以及后续章节的案例分析中会经常出现。在每一小节的最后都会给出相关的案例分析。

本章我们先采用第 7 章 7.2 节所述方法，介绍三个耦合约束的案例。然后，根据第

7 章 7.3 节所述方法，研究三个冲突目标的案例。

8.2 多约束：轻质压力容器

制作轻质压力容器的最佳材料是什么？容器的半径 R 是预先确定的。同时，要确保在施加压力 p 时，不会因发生屈服或快速断裂而失效，且要尽可能地轻（表 8.1）。

表 8.1 安全压力容器的设计要求

功能	轻质压力容器(能安全的容纳压力 p)
约束条件	半径 R 指定
	不会屈服失效
	不会快速断裂失效
目标	质量最小化
自由变量	壁厚 t
	材料选择

这是第 7 章 7.2 节所述的“min-max”类问题。压力容器是第 6 章 6.11 节的主题，我们利用当时的一些结果来解决这个新问题。

1. 解读

薄壁球形压力容器（见图 6.19）的质量如下：

$$m = 4\pi R^2 t\rho$$

式中，t 是壁厚；ρ 是材料密度。这就是目标函数，是需要最小化的量。

容器壁的应力如下：

$$\sigma = \frac{pR}{2t} \tag{8.1}$$

容器不发生屈服必须满足 $\sigma<\sigma_y$，其中 σ_y 是容器壁所用材料的屈服强度。对此，要求的壁厚如下：

$$t \geqslant \frac{pR}{2\sigma_y}$$

代入质量公式可得：

$$m_1 \geqslant 2\pi R^3 p\left(\frac{\rho}{\sigma_y}\right) \tag{8.2}$$

上式包含指标：

$$M_1 = \frac{\rho}{\sigma_y} \tag{8.3}$$

为确保不发生快速断裂，条件是 $\sigma<\sigma_f$，其中：

$$\sigma_f = \frac{K_{\mathrm{IC}}}{C\sqrt{\pi a_c^*}}$$

此处，$2a_c^*$ 是容器壁内最大裂纹或缺陷的直径；C 是常数，这里我们取 1；K_{IC}是平面应变断裂韧度。这就要求壁厚必须满足：

$$t \geqslant \frac{pR\sqrt{\pi a_c^*}}{2K_{\mathrm{IC}}}$$

代入质量公式可得：

$$m_2 \geqslant 2\pi R^3 p\sqrt{\pi a_c^*}\left(\frac{\rho}{K_{\mathrm{IC}}}\right) \tag{8.4}$$

其中，包含指标：

$$M_2 = \frac{\rho}{K_{\mathrm{IC}}} \tag{8.5}$$

联立这两个质量方程，可得 M_1 和 M_2 的耦合线方程：

$$M_2 = \frac{1}{\sqrt{\pi a_c^*}} M_1 \tag{8.6}$$

其中，耦合常数如下：

$$C_c = 1/\sqrt{\pi a_c^*}$$

2. 选择

图 8.1 和图 8.2 均以指标 M_1 和 M_2 为坐标轴，图中给出了对应不同裂纹长度 a_c^* 的耦合线。选出材料所容许的最长裂纹所对应的耦合线，在耦合线上方断裂韧度约束主导质量，而在耦合线下方，屈服强度约束主导质量。

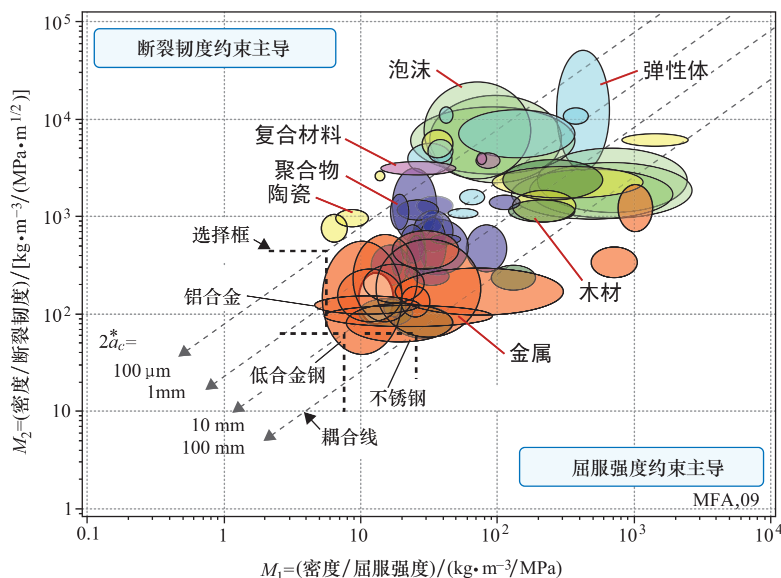


图 8.1　过约束设计会导致两个甚至更多的性能指标，这些指标通过耦合方程来相关联（图中对角虚线给出了对应四个裂纹长度值的耦合方程。选择线与耦合线相交可构成盒形选择框。）

图 8.1 所示涵盖了所有的材料种类，因而分辨率很低。材料选择的过程如下：将盒形选择框的角点放置在合适的耦合线上，然后沿着耦合线往下移动，同时减小 M_1 和 M_2，直到盒形选择框内只包含少量候选材料，再进行后续的文档检索。基于上述过程可知，铝合金和钢是最好的选择，但是要想得到进一步的结果，我们需要更多的细节。图 8.2 就提供了这些信息。图 8.2 的坐标轴与图 8.1 所示一致，但是材料限于高强度低合金钢、不锈钢、铝合金和聚合物基复合材料。图 8.2 证实了之前的发现，并确定了在给定 a_c^* 下能获得最轻容器的具体合金。这里，我们将上述过程运行至极致，使得每

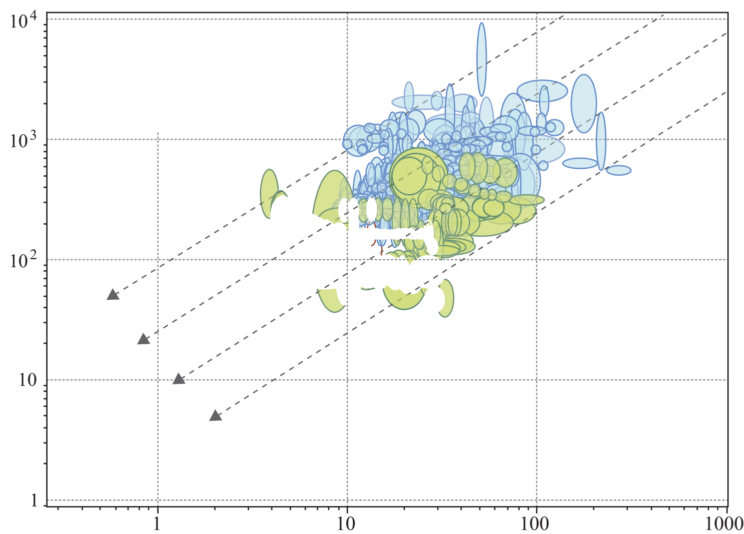


图 8.2 基本图形与图 8.1 一致，但分辨率更高（彩色椭圆给出了 960 钢、铝合金和复合材料的一些数据。）

一个选择框中只留下一种材料。相应的结果见表 8.2。

表 8.2 轻质压力容器材料的选择

裂纹尺寸 $2a_c^*$ /mm	所选材料
0.1	AISI 4340 低合金钢(回火温度 206℃)
1	7150 铝合金(T6 回火)
10	回火态 AISI 4135 低合金钢
100	AISI 304 不锈钢(HT B 级)

相关案例

见“安全压力容器”（见 6.11 节）。

8.3 多约束：高性能发动机连杆

连杆是高性能发动机、压缩机以及泵的关键部件。一旦发生失效，后果不堪设想。为了使惯性力和轴承负载最小化，质量应越小越好，这就意味着需要使用轻质、高强的材料，承压接近其所能承受的极限值。若设计目标为成本最小化，廉价的铸铁通常会成为连杆的材料；若设计目标为性能最大化，最佳连杆材料又是什么呢？表 8.3 总结了以最小化质量为目标，同时附带两个约束条件的连杆设计要求。约束条件为：在峰值载荷 F 下，既不会发生疲劳失效，也不会因弹性屈曲失效。为简化起见，假设轴为矩形截面，即 $A=bw$ （见图 8.3）。

1. 解读

和前面那个案例一样，这也是一个“min-max”问题。目标函数是质量方程，近似如下：

$$m=\beta AL\rho \tag{8.7}$$

式中，L 是连杆长度；ρ 是连杆材料的密度；A 是连杆截面面积；β 是考虑轴承座质量而采用的常数乘子。

表 8.3 连杆的设计要求

功能	用于发动机或泵的直线往复运动
约束条件	高周疲劳下不会失效
	弹性屈曲下不会失效
	冲程和连杆长度给定
目标	质量最小化
自由变量	横截面积 A
	材料选择

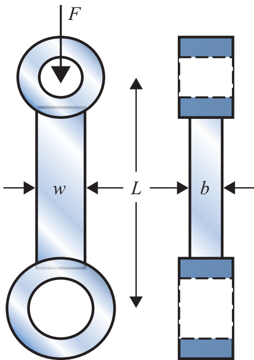


图 8.3 连杆（它不能因疲劳和屈曲而发生失效，是一个典型的多约束案例。）

为满足疲劳约束，要求：

$$\frac{F}{A} \leqslant \sigma_e \tag{8.8}$$

式中，σ_e 是连杆材料的疲劳极限（本书中我们忽略这类问题中常采用的安全系数，因为它并不影响选择）。联立式(8.7)和式(8.8)以消去 A，可得到仅满足疲劳约束的连杆质量：

$$m_1 = \beta F L \left(\frac{\rho}{\sigma_e}\right) \tag{8.9}$$

包含材料指标：

$$M_1 = \frac{\rho}{\sigma_e} \tag{8.10}$$

屈曲约束要求峰值载荷 F 不超过欧拉屈曲载荷，即：

$$F \leqslant \frac{\pi^2 EI}{L^2} \tag{8.11}$$

其中

$$I = \frac{b^3 w}{12}$$

$b = \alpha w$，α 是一个无量纲的"形状常数"，代表横截面积的比例系数。消去式(8.7)中的 A，可得到第二个质量方程：

$$m_2 = \beta \left(\frac{12F}{\alpha \pi^2}\right)^{1/2} L^2 \left(\frac{\rho}{E^{1/2}}\right) \tag{8.12}$$

包含第二个材料指标：

$$M_2 = \frac{\rho}{E^{1/2}} \tag{8.13}$$

为安全起见，连杆必须同时满足两个约束。对于给定长度 L，主动约束决定最大质量 m。图 8.4 给出了针对某种材料，质量 m 随着长度 L 的变化情况（式(8.9)和式(8.11)的草图）。连杆过短易发生疲劳失效，而过长则容易发生屈曲失效。

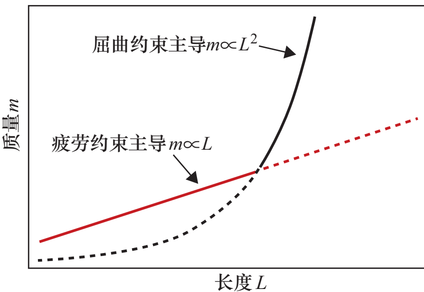


图 8.4 连杆质量与长度 L 的函数关系示意图

2. 选择

首先，考虑从表 8.4 所列材料清单中选择连杆的材料。设计参数如下：

$$L=200\text{mm},\ F=50\text{kN},\ \alpha=0.8,\ \beta=1.5。$$

根据式(8.9)和式(8.12)，表中列出了仅满足疲劳约束的连杆质量 m_1，以及仅满足屈曲条件的连杆质量 m_2。对于其中三种材料，主动约束是疲劳约束，另外两种材料的主动约束则为屈曲约束。每种材料的 m_1 和 m_2 中的较大者列于表中最后一列，即同时满足两个约束的最小质量。$\tilde{m}$ 值最小的材料制成的连杆最轻质。本例中钛合金 Ti-6Al-4V 最优，金属基复合材料 Duralcan 6061-20% SiC 次之。它们制成的连杆质量都不到铸铁连杆质量的一半。

上述过程是一种选择方式，但远不是最好的方式。首先，它通过一些“预选”过程来得到表中的材料，但未解释其实现过程。其次，该结果仅适用于给定的 F 和 L。当 F 和 L 改变时，最终选择也会改变。如果我们想避开上述限制，图表方法是一个很好的途径。

要想兼顾疲劳和屈曲约束，连杆质量必须是 m_1 和 m_2 中的较大者。假设它们相等，将会得到第 7 章 7.2 节中定义的耦合线方程：

$$M_2=\left[\left(\frac{\alpha\pi^2}{12}\cdot\frac{F}{L^2}\right)^{1/2}\right]\cdot M_1 \tag{8.14}$$

方括号内的量为耦合常数 C_c，包含第 5 章 5.6 节所述的结构指标 F/L^2。

表 8.4 连杆材料的选择

材料	$\rho/(\text{kg/m}^3)$	E/GPa	σ_e/MPa	m_1/kg	m_2/kg	$\tilde{m}=\max(m_1,m_2)$/kg
球墨铸铁	7150	178	250	0.43	0.22	0.43
HSLA 钢 4140	7850	210	590	0.20	0.28	0.28
Al S355.0 铸造合金	2700	70	95	0.39	0.14	0.39
Duralcan Al-SiC(p)复合材料	2880	110	230	0.18	0.12	0.18
Ti-6Al-4V	4400	115	530	0.12	0.17	0.17

通过以 M_1 和 M_2 为坐标轴的图表，我们可以确定具有最佳 M_1 和 M_2 组合的材料。图 8.5 就是这样一张图表，面向轻合金数据库，同时包含铸铁用以比较。图中绘制了对应两种 F/L^2 值的耦合线，取 $\alpha=0.8$。此外，图中给出了两种极端情况下的盒形选择框，其中一个对应结构指标 F/L^2 值高的情况，而另一个对应结构指标 F/L^2 值低的情况。就铍和其合金而言，对应上述结构指标范围内所有 C_c 值，它们都是最佳选择。除此以外，当 F/L^2 很大时（$F/L^2=5\text{MPa}$），最佳选择是钛合金，如 Ti-6Al-4V；当 F/L^2 很小时（$F/L^2=0.05\text{MPa}$），相对于铝合金和钛合金，类似于 AZ61 的镁合金是最好的选择。表 8.5 列出了最终结果。

表 8.5 高性能连杆材料的选择

材料	备注
镁合金	AZ61 及相关合金能提供很好的性能
钛合金	对于高 F/L^2 的情况，Ti-6Al-4V 是最佳选择
铍合金	最终选择，但难以加工且昂贵
铝合金	比钛和镁要便宜，但是性能差

3. 附言

连杆可由表中的任意一种材料制成。铝合金和镁合金用于公路车连杆，钛合金和铍合金（极少使用）用于赛车发动机连杆。如果将 CFRP 列入备选材料，不难发现，在现行标准下该材料的表现也是不错的。该结论是由他人得出的，他们为此进行了一些试验，至少做出了三款 CFRP 设计原型。要知道，设计一款 CFRP 连杆是十分困难

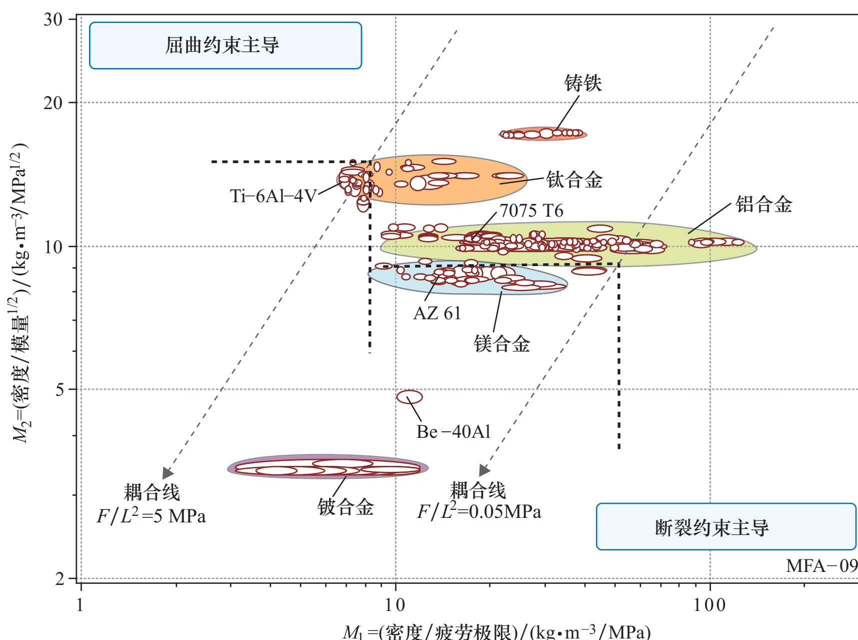


图 8.5 连杆的耦合约束图（对角虚线为对应 F/L^2 两极值的耦合方程。图中给出了盒形选择框。）

的。内部纤维必须连续，否则在封入连杆和轴承座时很容易断裂。此外，轴上必须有相当高比例的纤维，其方向需与力 F 作用方向一致。作为一个挑战，试想一下，你会如何实现呢？

相关案例：

见“桌腿材料”（见 6.4 节）、“多约束：高强磁场线圈”（见 8.4 节）、“竞赛用自行车的车叉子”（见 10.3 节）、“桌腿：薄或轻？”（见 10.5 节）。

8.4 多约束：高强磁场线圈

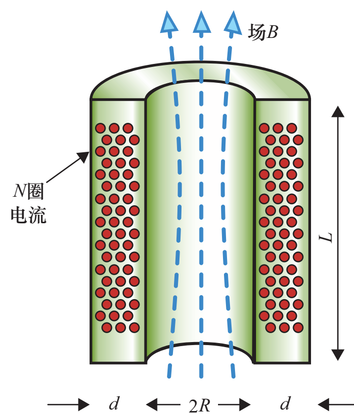


图 8.6 高强磁场线圈（要满足两个约束：第一不能过热，第二不能因径向磁场力而失效。）

物理学家对物体处于高强磁场内时的行为非常感兴趣。高强磁场意味着磁感应强度为 50T 甚至更高，而这种磁场的获取方式依然是十分传统的方式，即在导线绕成的线圈中通入大电流，它既不是永久磁铁（实际上限：1.5T），也不是超导线圈（上限：25T），却能实现高强磁场（见图 8.6）。只要有电流通过，就会产生持续的场脉冲，场脉冲的上限和持续时间取决于线圈材料。如果磁场太强，磁场力会将整个线圈分解；如果持续时间太久，会导致线圈熔化。因此，选择合适的材料制作线圈是至关重要的。那怎样的材料才是合适的呢？这取决于脉冲长度。

表 8.6 根据场脉冲的持久性和强度对其作了分类。表 8.7 给出了磁场线圈的生产要求。设计目标只有一个，即磁场最大化，同时需满足两个约束，以确保生存性要求。这两个约束是：绕组要有足够的强度来承受磁场产生的径向力，且不能过热。

表 8.6 脉冲磁场的持久性和强度

分类	持久性	磁感应强度
连续	1s~∞	<30T
长	100ms~1s	30~60T
标准	10~100ms	40~70T
短	10~1000μs	70~80T
超短	0.1~10μs	>100T

表 8.7 高强磁场线圈的设计要求

功能	磁场线圈
约束条件	没有机械失效
	温升<100℃
	半径 R 和长度 L 规定
目标	磁场最大化
自由变量	线圈的材料选择

1. 解读

详细建模会很复杂，因此我们先从一系列猜想入手。首先，如果绕组需承载（第一个约束），那么就必须有足够强度。强度越高，所能承受的磁场越大。所以，我们需要的材料必须有高的弹性极限 σ_y（猜想 1）。其次，电流 i 在电阻为 R_e 的线圈中传输时间 t_p 所产生的热是 $i^2R_et_p$ 焦耳。如果发生在空间 V 内，那么温升为：

$$\Delta T=\frac{i^2R_et_p}{VC_p\rho}$$

式中，C_p 是材料的比热容；ρ 是密度。为使电流最大化（即磁感应强度 B），我们需要的是 $R_e/C_p\rho$ 值低的材料（猜想 2）。对于几何形状固定的线圈，由于电阻 R_e 正比于电阻率 ρ_e，此时我们需要 $\rho_e/C_p\rho$ 值小的材料。

两个猜想都是正确的，一直以来我们也是这样做的。简单的搜索 σ_y 值高（或 $M_1=1/\sigma_y$ 低）以及 $M_2=\rho_e/C_p\rho$ 低的材料将会得到合乎情理的子集。图 8.7 给出了约 1200 种金属和合金的 M_1 与 M_2 值（此处忽略黑色的选择框）。最佳指标组合的材料位于聚集区的下包络。当脉冲很短时，强度是主要约束，这就要求材料具有很低的 M_1 值，因此靠近 A 区域的材料是最佳选择；当脉冲很长时，温升是主要约束，此时靠近 B 区域具有低 M_2 值的材料是最佳选择。

这样一个过程或许已经足够，但是如果想要更好的解决方案，我们必须放弃猜想，借助于“极值法”。这就要求更为细致的建模。这有点复杂难懂，如果让你觉得过于讨厌的话，可以直接跳到下一节“选择”。

首先考虑磁场力的破坏性。在很长的螺线管内，磁感应强度 B（单位：$\mathrm{Wb/m^2}$）为：

$$B=\frac{\mu_0Ni}{L}\cdot\lambda_f\cdot F(\alpha_t,\beta) \tag{8.15}$$

式中，μ_0 是空气渗透性（$4\pi\times10^{-7}\,\mathrm{Wb/(A\cdot m)}$）；$N$ 是匝数；i 是电流强度；L 是线圈长度；λ_f 是填充因数，考虑绝缘层的厚度（λ_f=线圈的横截面积/导体的横截面积）；F

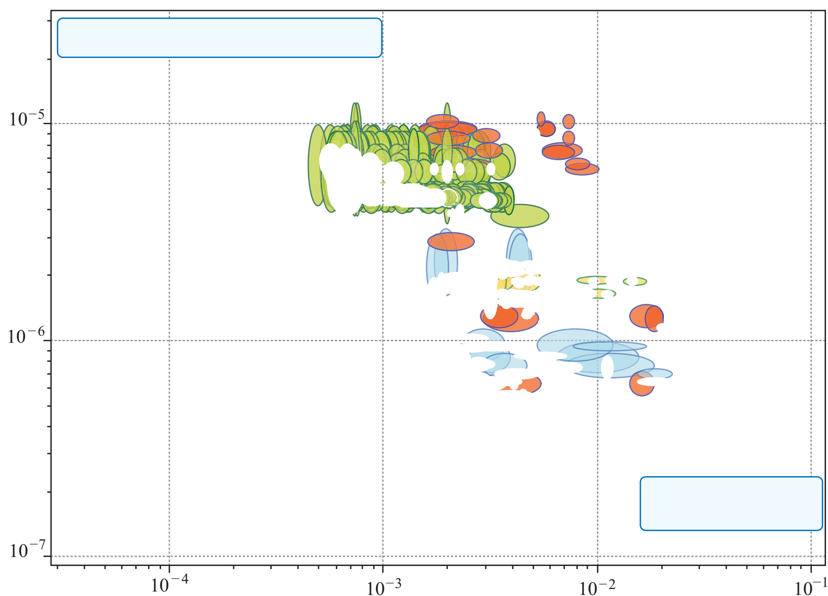


图 8.7　高强磁场或电动机线圈用的两类材料组别（两个轴分别为前文提到的两个猜想，通过建模可证实之前的选择，并且针对给定脉冲长度可给出选择线的精确定位。）

注：Glidcop—纳米氧化铝颗粒增强铜基合金。

是几何常数（形状因子），仅取决于磁体部分。这里，我们不需要关心 F 的具体数值。

磁场对载流线圈产生一个沿径向向外的磁场力，就像压力容器所受到的压力。它实际上是一个体积力，而不是面力。单位面积的幅值 p 为：

$$p=\frac{B^2}{2\mu_0\cdot F(\alpha,\beta)}$$

压力在线圈和套管上形成的应力 σ 为：

$$\sigma=\frac{pR}{d}=\frac{B^2}{2\mu_0\cdot F(\alpha,\beta)}\cdot\frac{R}{d}\tag{8.16}$$

σ 不能超过线圈的屈服强度 σ_y，可以得到磁感应强度 B 的第一个约束条件：

$$B_1\leqslant\left(\frac{2\mu_0 d\sigma_y\cdot F(\alpha,\beta)}{R}\right)^{1/2}\tag{8.17}$$

通过最大化 σ_y 可以使场强最大化，即最小化：

$$M_1=\frac{1}{\sigma_y}\tag{8.18}$$

由此，证明了猜想 1。

现在考虑过热破坏问题。高能磁铁通常都会先在液氮中冷却至−196℃以减小线圈电阻。如果线圈温度超过室温，电阻 R_e 通常会变得很大。整个磁场脉冲的能量都转化为热量，即 $\int i^2R_e dt\approx i^2\bar{R}_e t_p$（其中 $\bar{R}_e$ 是整个加热过程中的平均电阻，t_p 是脉冲长度）。由于没有充分的时间来散热，这些能量将会使线圈温度增加 ΔT：

$$\Delta T=\frac{i^2\bar{R}_e t_p}{C_p\rho V}=\frac{B^2}{\mu_0^2}\cdot\frac{\rho_e t_p}{d^2 C_p\rho} \tag{8.19}$$

式中，ρ_e 线圈材料的电阻率；V 是体积；C_p 是比热容（J/kg・K）；ρ 是密度。如果温度上限是 200K，$\Delta T_{max}\leqslant 100K$，得到磁感应强度 B 的第二个约束条件：

$$B_2\leqslant\left(\frac{\mu_0^2 d^2 C_p\rho\lambda_f\Delta T_{max}}{\rho_e t_p}\right)^{1/2}F(\alpha,\beta) \tag{8.20}$$

通过最小化 M_2，可实现磁场强度的最大化：

其中
$$M_2=\frac{\rho_e}{C_p\rho} \tag{8.21}$$

猜想 2 得以证实。图 8.8 给出了磁感应强度 B 的两个方程式对应脉冲时间 t_p 的变化形式。对于短脉冲，强度限制是主动约束；对于长脉冲，温度限制为主动约束。

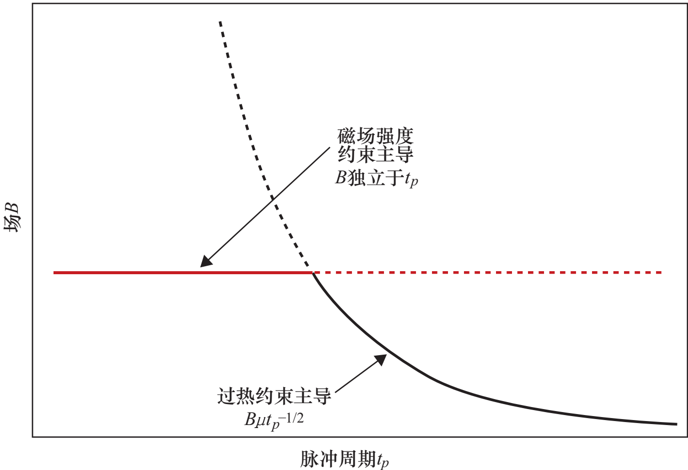


图 8.8 有关磁感应强度 B 的两个方程随脉冲时间的变化趋势（可用于识别主动约束。）

2. 选择

表 8.8 列出了三种线圈候选材料的性能。基于下述设计要求，第六列给出了受强度限制的磁感应强度 B_1，第七列给出了受温度限制的磁感应强度 B_2。

$$t_p=10ms,\ \lambda_f=0.5,\ \Delta T_{max}=100K,$$
$$F(\alpha,\beta)=1,\ R=0.05m,\ d=0.1m。$$

对于铜基合金来说，强度是主动约束；而对于钢来说，温度是主动约束。最后一列为最终的磁感应强度上限 $\bar{B}$。其中，铜镍合金的 $\bar{B}$ 最大。

表 8.8 脉冲长度为 10ms 的高强磁铁材料的选择

材料	ρ/(kg/m³)	σ_y/MPa	C_p/[J/(kg・K)]	ρ_e/[10^{-8}/(Ω・m)]	B_1/(Wb/m²)	B_2/(Wb/m²)	$\bar{B}$/(Wb/m²)
高导电性铜	8940	250	385	1.7	35	113	35
Cu-15%Nb 合金	8900	780	368	2.4	62	92	62
HSLA 钢	7850	1600	450	25	89	30	30

到目前为止，似乎一切顺利，但是我们同样面临上个案例中出现过的问题。即，

除了预先选出的上述三种材料，肯定还会有其他的候选材料。此外，我们所做的选择是针对特定的磁场和脉冲长度的。如果这些改变了，结果也会因此改变。所以，我们需要采用图表法。

图 8.8 中的交点对应式(8.17)和式(8.20)相等的情况，即耦合线方程：

$$M_2 = \left[\frac{\mu_0 R d \lambda_f F(\alpha,\beta)\Delta T_{max}}{2t_p}\right] \cdot M_1 \tag{8.22}$$

式中，方括号内的量为耦合常数 C_c，其大小取决于脉冲长度 t_p。

现在回到图 8.7 中，两个坐标轴分别为指标 M_1 和指标 M_2。其中给出了三种材料选择，一种对应超短脉冲磁场，另外两种对应较长脉冲。每一个选择框的轮廓线都对应一个恒定磁感应强度 B。选择框角点位于耦合线上，对应合适的脉冲长度。对于给定脉冲长度，最好的材料选择位于耦合线最左下方的选择框内。表 8.9 给出了最终的结果。

表 8.9　高强磁场线圈材料的选择

材料	备　注
连续长脉冲 高导电性铜 纯银	低场强、长脉冲磁场的最佳选择(过热约束)
短脉冲 铜-氧化铝复合材料 H-C 铜镉合金 H-C 铜锆合金 H-C 铜铬合金 拉拔铜-铌复合材料	高场强、短脉冲磁场的最佳选择 (过热约束和强度约束)
超短脉冲，超强磁场 铜-铍-钴合金 高强低合金钢	高场强、短脉冲磁场的最佳选择(强度约束)

3. 附言

这里所提到的学习案例都已经过充分简化。事实上，如今的磁场设计是十分复杂的，除了几何形状这个最重要的因素外，还涉及电磁铁和超导磁铁的嵌套组合。但是，线圈材料的选择方案还是有合理性的。长脉冲时，电阻率是主要的考虑因素；短脉冲时，磁感应强度则是主要的考虑因素，与之相应的最佳选择如上所述。对于高速发动机、汇流排和继电器来说，材料选择也可做类似考虑。

相关阅读：

Herlach, F. (1988). The technology of pulsed high-field magnets. *IEEE Transactions on Magnetics*, 24, 1049.

Wood, J. T., Embury, J. D., & Ashby, M. F. (1995). An approach to material selection for high field magnet design. *Acta Metal. et Mater.*, 43, 212.

相关案例：

见“多约束：高性能发动机连杆”(见 8.3 节)。

8.5　冲突目标：桌腿

现在，我们将讨论的重点从多约束设计转到冲突目标设计，采用第 7 章 7.3 节中提

到的方法。这里我们还是以细长桌腿的材料选择这个例子来加以讨论。

1. 解读

由 Snr. Tavolino 设计的桌子，其设计要求（见表 6.5）包含两个目标，即桌腿必须要尽量轻和细。桌腿质量(式(6.8))正比于指标 M_1：

$$M_1 = \frac{\rho}{E^{1/2}}$$

厚度 $2r$(式(6.9))与 M_2 成函数关系：

$$M_2 = \frac{1}{E}$$

Snr. Tavolino 希望二者同时达到最小化。

2. 选择

权衡图是解决这类多目标问题的有效方法。图 8.9 给出了权衡图的例子。其中，M_1 和 M_2 分别为纵轴与横轴。为清楚起见，图中只有铁基合金、轻合金、复合材料和木材，几乎涵盖了所有可能的候选材料。由于弹性模量和密度的范围都很窄，因此上述材料紧紧聚集在一起。

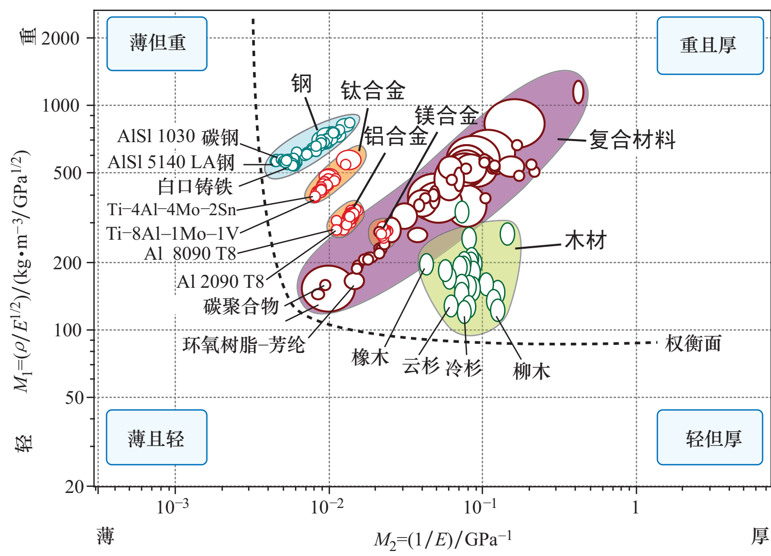


图 8.9 桌腿材料的选择（位于权衡面附近的材料已做了标识。）

潜意识里，我们可能会认为由云杉和冷杉做成的桌腿比其他材料做成的桌腿更轻，然而由复合材料制成的桌腿虽然在重量上差不多，但是更纤细。更有趣的是，它们并不是最纤细的，而是钢制桌腿更细。由轻合金制成的桌腿虽然比钢制桌腿更轻，但是没有它细。综上所述，复合材料在二者之中达到最佳平衡——拥有很轻的质量和可观的纤细度。

3. 附言

正如我们第 6 章 6.4 节中提到的那样，难道管状桌腿不会更轻吗？也许会更粗，但是究竟会粗多少呢？管状桌腿会不会是最佳选择？答案将在第 10 章 10.5 节中揭晓。

相关案例：

见“桌腿材料”（见 6.4 节）。

8.6 冲突目标：必备电子产品的超薄外壳

轻巧是电子类消费产品的主要设计要求，如便携式电脑、移动电话、掌上电脑和 MP3 播放器等。最理想的效果是你可以将它放入衬衣口袋，甚至感觉不到它的存在，同时外壳又有足够的刚度和强度以保护该电子产品，尤其是显示器，免受损害。过去的外壳材料往往是 ABS 或者聚碳酸酯，为了保证足够的强度，外壳至少要有 2mm 厚。这对于今天的设计来说，厚度和质量都太大了。但是太薄的外壳也会导致严重的后果。一旦不小心坐在了手机上，或者在便携式电脑上堆了厚厚的书，如果外壳刚度不够的话，就会发生变形，并导致屏幕的损坏。现在的挑战是确定一种外壳材料，在保证刚度至少和 2mm 厚 ABS 相当的前提下，更薄更轻。我们必须认识到，最轻的材料未必是最薄的，反之亦然，因此在二者之间取得权衡很重要。表 8.10 对上述要求作了总结。

表 8.10　便携式电子产品外壳的设计要求

功能	轻质，薄外壳
约束条件	弯曲刚度规定
	尺寸 L 和 W 规定
目标	外壳厚度最小化
	外壳质量最小化
	材料成本最小化
自由变量	外壳壁量 t
	材料选择

1. 解读

我们将外壳平板的受载情况理想化成如图 8.10 所示的形式。外载荷将会导致其发生弯曲。弯曲刚度为：

$$S=\frac{48EI}{L^3}$$

其中

$$I=\frac{Wt^3}{12} \tag{8.23}$$

式中，E 是弹性模量；I 是平板的截面惯性矩；L、W 和 t 如图 8.10 所示。如果想平板工作良好，刚度 S 必须不小于设计所要求的刚度 S^*。联合上述两个方程可得出厚度 t 的范围，即式 (8.24)：

$$t\geqslant\left(\frac{S^*L^3}{4EW}\right)^{1/3} \tag{8.24}$$

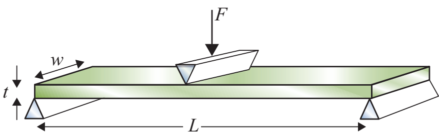


图 8.10　外壳可理想化为 $L\times W\times t$ 的平板，受弯曲载荷

由此可见，最薄的板应由材料指标 M_1 值最小的材料制成：

$$M_1=\frac{1}{E^{1/3}}$$

平板单位面积的质量为 m_a，即 ρt，其中，ρ 是密度。因此，最轻的板应由材料指标 M_2 值最小的材料制成：

$$M_2 = \frac{\rho}{E^{1/3}} \tag{8.25}$$

我们将现有 ABS 平板的刚度 S^* 作为比较标准。如果 ABS 的弹性模量和密度分别为 E_0 和 ρ_0，那么根据式（8.24），由其他材料（弹性模量 E，密度 ρ）制成的平板，其厚度相对于由 ABS 制成的平板厚度为：

$$\frac{t}{t_o} = \left(\frac{E_o}{E}\right)^{1/3} \tag{8.26}$$

并且，单位面积的相对质量为：

$$\frac{m_a}{m_{a,o}} = \left(\frac{\rho}{E^{1/3}}\right)\left(\frac{E_o^{1/3}}{\rho_o}\right) \tag{8.27}$$

为得到可行的解决方案，我们要在 t/t_o 和 $m_a/m_{a,o}$ 之间加以权衡。

2. 选择

图 8.11 给出了所需要的权衡图。为简化起见，此处仅讨论几类材料。整个图形分为四部分，以 ABS 材料为中心，对应坐标（1，1）。区域 A 内的材料相对 ABS 材料来说既轻且薄，有些材料相对因子达到 2；在区域 B、C 内的材料相对 ABS 材料来说只有某一个指标更好，而另外一个指标较差；而区域 D 内的材料则是两方面都更差。为确定出最佳选择，我们补绘了一个权衡面，即图中所示的虚线。最靠近权衡面的方案，就任意一个指标而言，都是好的选择。直觉告诉我们应该选择在区域 A 内或靠近区域 A 的材料。

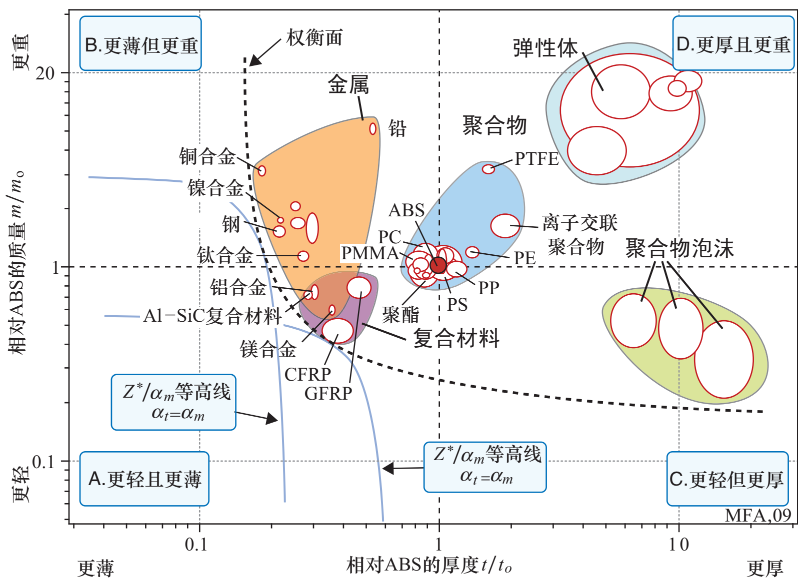


图 8.11　不同材料所制成外壳的相对厚度与相对质量

（权衡面附近的材料已做了标识。）

上述方法已足以指导我们做出正确的选择以保证质量或厚度上的减小。如果我们

想做成更精确的选择，必须采用一个罚函数，定义为 Z^*，以货币单位来计量：

$$Z^*=\alpha_t^*\frac{t}{t_o}+\alpha_m^*\frac{m_a}{m_{a,o}} \tag{8.28}$$

式中，交换常数 α_t^* 是厚度减少百分比所引起的罚函数的变化量；交换常数 α_m^* 是质量减少百分比所引起的罚函数的变化量。

举例说明，假设 $\alpha_t^*=\alpha_m^*$，意味着二者的重要性相同，那么罚函数相同的材料都分布在下面的等高线上：

$$\frac{Z^*}{\alpha_m^*}=\frac{t}{t_o}+\frac{m_a}{m_{a,o}} \tag{8.29}$$

式中，右边第一项由式(8.26)给出；第二项由式(8.27)给出。图 8.12 给出了金属、聚合物和复合材料的选择。ABS 靠近聚合物群组的中心。相比于 ABS，CFRP、GFRP、钛合金和镁合金所制成的外壳都有更低的 Z^* 值。

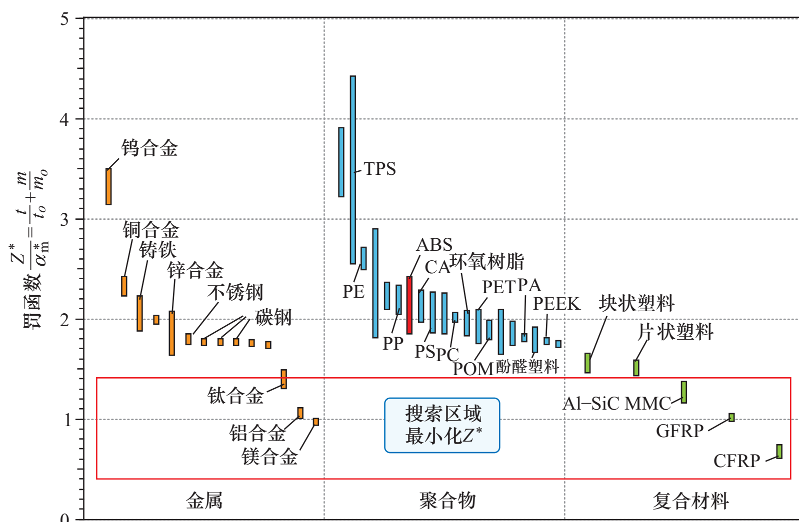


图 8.12 当 $\alpha_t^*=\alpha_m^*$ 时，罚函数为 Z^*/α_m^*

（ABS 位于聚合物群组的中间位置，在它下面的材料有更低的罚函数，代表更好的选择。）

这幅图的局限性在于它只针对某一个特定的 α_t^*/α_m^* 值。如果厚度和质量的相对重要性改变了，排序也会因此改变。通过在权衡图上建立罚函数等高线，我们可以得到一个更通用的方法。图 8.11 中的两条蓝线正是这样的等高线。随着 Z^*/α_m^* 逐渐减小，式(8.29) 对应的线性关系可在左下方绘成一系列曲线（由于是对数坐标，因而不是直线）。当然，我们关心的并不是 Z^*/α_m^* 的确定值，而是该值所对应曲线与权衡面的切点位置(见图 8.11)。最接近这个点的方案，即 CFRP、镁合金和 Al-SiC 复合材料是最佳选择。如果令 $\alpha_t^*=10\alpha_m^*$，意味着相对于质量我们更看重厚度，此时罚函数线会移至图 8.11 所示的第二个位置。针对这种情况，钛合金甚至钢都很有可能成为候选材料。

3. 附言

追溯到 1997 年，当极薄和极轻第一次成为设计主要诉求的时候，本例给出的材料选择还是非常现代的，几乎所有的手持电子产品的材料都是 ABS、聚碳酸酯，偶尔还

是钢。时过境迁，现在的市场中铝合金、镁合金、钛合金，甚至是 CFRP 外壳随处可见。这个案例分析的价值在于阐述多目标选择的系统方法。

相关案例：

见“冲突目标：制动钳材料”（见 8.7 节）。

8.7 冲突目标：制动钳材料

绝大多数情况下，价格都是一个十分重要的因素。但在某些情况下，它却不那么重要，特别是在特定领域起决定性作用的材料，如在空间领域（用于结构部件的铍和用于屏蔽辐射的铱）、医疗领域（金质牙齿填料），以及竞技运动器材领域（竞赛摩托车有一个由纯银制成的气缸头以保证高传热性）。下面是另外一个例子——F1 赛车的制动钳材料。

1. 解读

制动钳可以简化为两根尾部固定在一起，长为 L、宽为 b，且厚度为 h 的梁（详见图 8.0 和图 8.13）。当制动时，每一根梁都承受弯曲载荷，且由于制动时会产生热量，梁的温度会升高。下方的简图代表其中的一根梁，在长度和宽度给定情况下，梁的刚度 S 是关键指标。如果刚度不够，制动盘会弯曲，损害制动效率并导致振动。导热性也是至关重要的，在制动过程中累积的热量需要及时传递。表 8.11 对上述要求做了总结。

表 8.11 制动钳的设计要求

功能	制动钳
约束条件	弯曲刚度 S^* 规定
	尺寸 L 和 b 规定
目标	卡钳质量最小化
	热传递最大化
自由变量	卡钳壁厚 t
	材料选择

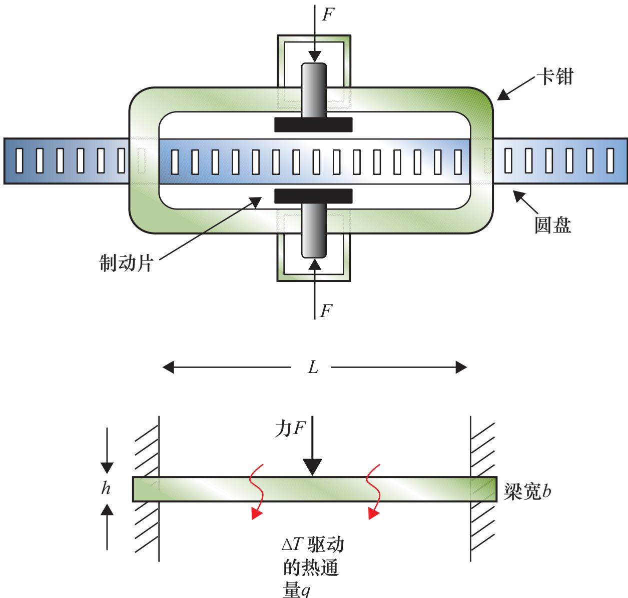


图 8.13 制动钳示意图（卡钳长臂需承受弯曲载荷，且要有良好的导热性以防止过热。）

卡钳的质量与单根梁的质量成比例，单位面积的质量为：

$$m_a = h\rho (\text{单位:kg/m}^2) \tag{8.30}$$

式中，ρ 是所用材料的密度；热流量 q 取决于梁的导热系数 λ；单位面积的热流量为：

$$q_a = \lambda \frac{\Delta T}{h} (\text{单位:W/m}^2) \tag{8.31}$$

式中，ΔT 为两个面之间的温度差。

L、b 和 ΔT 的值都是给定的，唯一的自由变量是厚度 h。但是，存在一个约束，即卡钳必须有足够的刚度以保证其不会弯曲或过振。为满足该约束，我们要求：

$$S = \frac{C_1 EI}{L^3} = \frac{C_1 Ebh^3}{12L^3} \geqslant S^* (\text{单位:W/m}^2) \tag{8.32}$$

式中，S^* 是设计刚度；E 是弹性模量；C_1 是一个取决于载荷分布的常数；$I=bh^3/12$ 是梁的截面惯性矩。因此，有：

$$h \geqslant \left(\frac{12S^*}{C_1 bE}\right)^{1/3} L \tag{8.33}$$

将式(8.33)代入式(8.30)和式(8.31)，可分别得出单位面积的质量 m_a 和热流密度 q_a 的表达式：

$$m_a \geqslant \left(\frac{12S^*}{C_1 b}\right)^{1/3} L\left(\frac{\rho}{E^{1/3}}\right)(\text{单位}:\mathrm{kg/m^2}) \tag{8.34}$$

$$q_a = \frac{\Delta T}{L}\left(\frac{C_1 b}{12S^*}\right)^{1/3}(\lambda E^{1/3})(\text{单位}:\mathrm{W/m^2}) \tag{8.35}$$

式(8.34)包含材料指标 M_1：

$$M_1 = \frac{\rho}{E^{1/3}}$$

式(8.35)包含材料指标 M_2：

$$M_2 = \frac{1}{\lambda E^{1/3}}$$

制动卡钳的标准材料是球墨铸铁，其价格便宜且刚度好，但是质量大且导热性略差。我们以此作为比较标准，利用铸铁的相关属性值（密度 ρ_o，弹性模量 E_o，导热系数 λ_o）来标准化式(8.34)和式(8.35)，可得到：

$$\frac{m_a}{m_{a,o}} = \left(\frac{\rho}{E^{1/2}}\right)\left(\frac{E_o^{1/3}}{\rho_o}\right) \tag{8.36}$$

和

$$\frac{q_{a,o}}{q_a} = \frac{\lambda_o E_o^{1/3}}{\lambda E^{1/3}} \tag{8.37}$$

q_a 的表达式采用的是倒置形式，因此最佳的材料是使其最小化。图 8.14 以 $\frac{m_a}{m_{a,o}}$ 和 $\frac{q_{a,o}}{q_a}$ 为坐标轴，以位于坐标（1，1）的铸铁为中心将图形分为四个象限。每一个气泡代表一种材料。左下方区域的材料在任一目标上都优于铸铁，比如铝制卡钳在重量上只有铸铁的一半，而传热能力是其两倍。最终的选择是铍或其合金（铍和 40%的铝）。

为进一步分析，我们可建立相对惩罚函数：

$$Z^* = \alpha_m^*\left(\frac{m_a}{m_{a,o}}\right) + \alpha_q^*\left(\frac{q_{a,o}}{q_a}\right) \tag{8.38}$$

式中，括号内的量可通过式(8.36)和式(8.37)得到。以铸铁为对比基准，交换常数 α_m^* 和 α_q^* 分别是质量减少百分比和传热增加百分比所对应的变化量。图 8.14 给出了对应三种交换常数比值的罚函数等高线。每一条曲线都与权衡面相切。排除非常规合金——铍合金，否则它将主导所有比值的选择。当减轻质量是主要的目标，即 $\alpha_q^*/\alpha_m^*=0.1$ 时，镁合金是最佳选择；当减轻质量与提高传热性能同等重要，即 $\alpha_q^*/\alpha_m^*=1$ 时，铝合金是最佳选择；当提高传热性是主要的目标，即 $\alpha_q^*/\alpha_m^*=10$ 时，铜基合金是最佳选择。

当然，真正的性能最佳，还是铍或其合金。

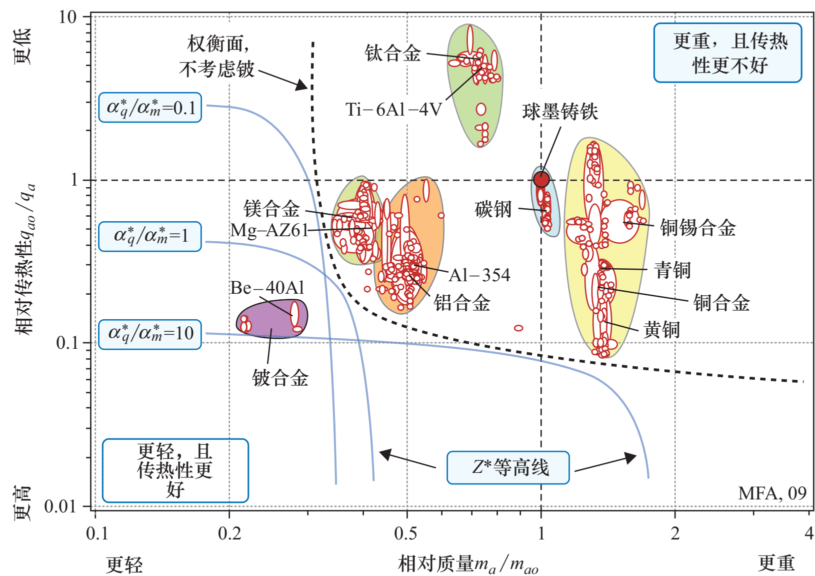


图 8.14 权衡图（以式(8.36)和式(8.37)所表示的量为坐标轴。铍及其合金是首选，可最小化质量且最大化传热性。如果排除这个选择，其他选择就依赖于 α_q^*/α_m^* 的比值。图中给出了权衡面以及对应三种比值的罚函数等高线。）

2. 附言

法拉利赛车曾经用过铍合金制动钳。如今，材料的严格限制使得铍合金制动钳不再允许使用，但却使 F1 赛车更具竞技性。

相关案例：

见“用于精密仪器的低热变形材料”（见 6.16 节）、“冲突目标：必备电子产品的超薄外壳”（见 8.6 节）。

8.8 本章小结

绝大多数的设计都是过约束的。它们必须同时满足许多相互竞争，甚至是相互冲突的要求。尽管如此，我们仍然可以获得一个最佳选择。第 7 章提到的“主动约束法”能够选出满足两个或更多约束的最佳材料。本章通过三个案例分析来阐述材料的选择过程，其中两个是力学的，另一个是电力学的。

当设计需要满足两个或更多相互冲突的目标时（如减重、体积、成本和环境影响），将会遇到更大的挑战。因此，我们需要一种方式以统一的标准来表示所有的目标，即所谓的“通用观点”。交换因子也称为交换常数。设定交换常数值是解决问题的关键一步。有了它，就能建立罚函数 Z，把所有的目标整合到一起。使得 Z 最小化的材料以一种恰当的权衡方式来满足所有的目标。最通用的衡量标准就是成本，因此要在成本与其他目标之间建立交换率。从原理上来讲，成本与质量，以及其他目标之间都可以进行转换。本章后三个案例对此做了详细阐述。

第 9 章

材料与形状的组合选择



图 9.0　挤压型材（感谢 Thomas Publishing 提供的图片）

9.1　引言

首先，让我们回想一下形状是如何改变材料应用性能的。每种材料都有一定的弹性模量和强度，一旦将其加工成工字形或者空心管，在承受弯曲和扭转载荷时其刚度会更好，强度会更高；也可将其压成小薄片，或者以线材的形式缠绕成螺旋弹簧，其刚度会明显降低。薄片有助于散热，蜂窝状则有助于储热。另外，还存在其他的形状，并具有各式各样的功能，如电容最大化和屏蔽磁场，控制光的反射、衍射和折射，以及反射声波或吸收声波。甚至可以通过改变形状来改变材料的触感，使其光滑或粗糙，

易滑或易握。当然，也正是形状将米勒的维纳斯从其雕刻所用的大理石坯料中脱胎换骨出来。形状真是个丰富的话题。

本章我们将探索其中的一部分，即形状如何来提高材料的机械效率。具有某种形状的型材比实心型材更能有效地承载弯曲、扭转和轴向压缩载荷。这里所指的形状有圆管、方形截面、工字形截面或类似的截面。所谓的“效率”是指，对于给定的承载条件，截面面积尽可能小。圆管、方形截面与工字形截面通常被称为简单截面。夹层板（承载薄板中间粘接泡沫或蜂巢结构）及更为精心设计的结构（如华伦式桁架）可以提供的效率更高。

本章在进行材料选择时，会将形状因素考虑在内（见图 9.1）。通常这是不必要的。在第 6 章中的案例分析中，形状要么未作考虑，即便考虑在内也不是一个变量。也就是说，我们在比较不同的材料时，所采用的形状都是一样的。但是，当两种材料可选，且每种材料有其自身的截面形状时，问题就来了。怎样找到材料及其形状的最佳组合？以自行车为例，自行车的车叉承受弯曲载荷，可由钢或木料做成（早期的自行车是由木料做成的）。钢可以做成薄壁管而木头却不能，木质构件通常是实心的。相同刚度的实心木质自行车肯定比实心钢质自行车要轻，但相比于钢管制成的自行车呢？或许工字型截面的镁合金材料还要更轻一些？简而言之，我们该如何选择材料和形状的最佳组合呢？

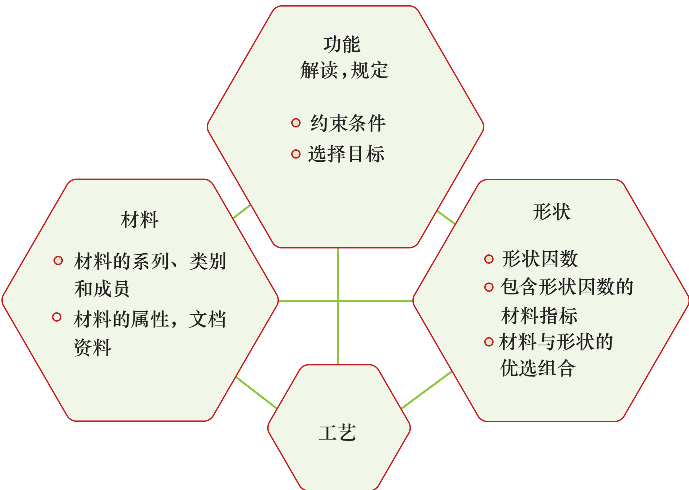


图 9.1 截面形状对于承载模式十分重要（当考虑形状时，材料指标中将引入一个新的术语，即形状因数。）

本章给出了求解此类问题的步骤，其中涉及形状因数的定义。材料可视为有特性无形状，结构则是具有一定形状的材料（见图 9.2）。形状因数可用于衡量材料的使用效率，或者更进一步说，对于第 5 章中提到的那些材料指标，现在其定义中需包含形状的影响。当形状固定时，这些材料指标可退化为第 5 章中提到的那些指标；但当形状是一个变量时，形状因

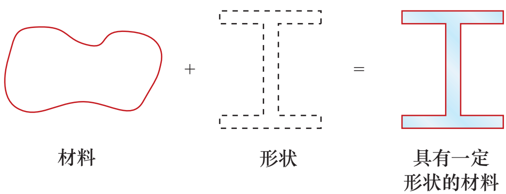


图 9.2 材料与宏观形状的组合可提升机械效率（形状可用无量纲的形状因数来描述。）

数便会在材料指标的表达式中出现。这些指标的存在使得我们可以比较不同形状的材料，然后选出材料与形状的最佳组合。为方便起见，我们将推导过程中涉及的符号列于表 9.1 中。不要担心，求解理念并不难。

表 9.1 符号的定义

符号	定义
M	力矩/(N·m)
F	力/N
E	截面材料的弹性模量/GPa
G	截面材料的剪切模量/GPa
σ_f	截面材料的屈服强度或失效强度/MPa
ρ	截面材料的密度/(kg/m^3)
m_l	单位长度截面质量/(kg/m)
A	横截面面积/m^2
I	截面惯性矩/m^4
I_o	方形参考截面的惯性矩/m^4
Z	抗弯截面系数/m^3
Z_o	方形参考截面的抗弯截面系数/m^3
K	扭转惯性矩/m^4
K_o	方形参考截面的扭转惯性矩/m^4
Q	抗扭截面系数/m^3
Q_o	方形参考截面的抗扭截面系数/m^3
ϕ_B^e	对应弹性弯曲变形的宏观形状因数
ϕ_B^f	对应弯曲失效或塑性变形开始的宏观形状因数
ϕ_T^e	对应弹性扭转变形的宏观形状因数
ϕ_T^f	对应扭转失效或塑性变形开始的宏观形状因数
ψ_B^e	对应弹性弯曲变形的微观形状因数
ψ_B^f	对应弯曲失效或塑性变形开始的微观形状因数
ψ_T^e	对应弹性扭转变形的微观形状因数
ψ_T^f	对应扭转失效或塑性变形开始的微观形状因数
S_B	弯曲刚度/(N·m)
S_T	扭转刚度/(N·m)
EI	抗弯刚度中的本质项/(N·m^2)
$Z\sigma_f$	抗扭刚度中的本质项/(N·m)
t	腹板与法兰厚度/m
c	腹板高度/m
d	夹层板的截面高度($2t+c$)/m
b	截面(法兰)宽度/m
L	截面长度/m

9.2 形状因数

零部件所受载荷可分解为轴向载荷、弯矩和扭矩，往往其中一种载荷起主导作用。对于特定的载荷，均有专门的结构单元来承载。杆承受拉伸载荷，梁承受弯矩，轴承受扭矩，柱承受轴向压缩载荷。图 9.3 给出了适应各种载荷的结构形状。图中表明，材料与形状的最佳组合取决于载荷类型。下面，我们将按照不同的载荷形式进行讨论。

对于轴向拉伸载荷，横截面面积起决定性作用，而截面形状几乎没有任何影响。只要横截面面积相同，就能承受相同的载荷。但对于弯曲载荷，情况则完全不同。相比于横截面面积相同的实心梁，中空方形截面梁或工字梁的表现要好得多。同样，对于扭矩载荷也有其高效的承载形状。例如，相比于横截面面积相同的实心梁或工字梁，圆管更为有效。为描述出形状的特性，我们需建立一种度量标准，即独立于材料评判

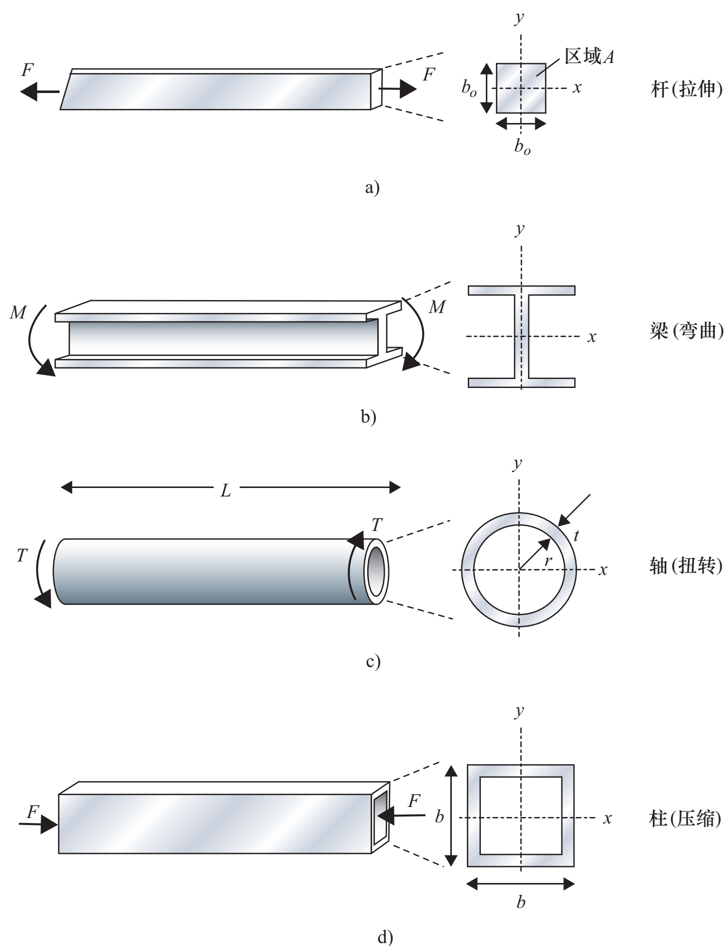


图 9.3 常用载荷形式以及用于承载的横截面形状
（轴向压缩有可能导致屈曲。）
a）轴向拉伸 b）弯曲 c）扭转 d）轴向压缩

截面形状结构效率的方法。显而易见，我们可以采用横截面形状相对于参考横截面形状的刚度或强度比值 ϕ 作为一种标准。这个参考横截面形状可以是相同横截面面积 A 的实心方形截面。由此，两者具有相同的单位长度质量 m_l（见图 9.4）。

1. 梁的弹性弯曲

梁的弯曲刚度 S 与 EI 成正比：

$$S \propto \frac{EI}{L^3}$$

式中，E 是弹性模量；I 是长度为 L 的梁沿弯曲轴（x 轴）的截面惯性矩。

$$I = \int_{\text{section}} y^2 \mathrm{d}A \qquad (9.1)$$

式中，y 是 $\mathrm{d}A$ 到弯曲轴的垂直距离；$\mathrm{d}A$ 是 y 处的微元面积。常见的截面惯性矩 I 与面积 A 的值列于表 9.2 的前两列。其中，复杂形状的惯性矩是近似值，但已足以满足当前的需求。对于长度为 b_o，横截面面积 $A = b_o^2$ 的方形参考截面梁，其截面惯性矩 I_o 为：

$$I_o=\frac{b_o^4}{12}=\frac{A^2}{12} \tag{9.2}$$

本书中所采用的下标 o 指的是实心方形参考横截面。某形状截面的弯曲刚度与相同面积方形参考截面的弯曲刚度的差异，可以用因子 ϕ_B^e 来衡量。该因子的定义如下：

$$\phi_B^e=\frac{S}{S_o}=\frac{EI}{EI_o}=\frac{12I}{A^2} \tag{9.3}$$

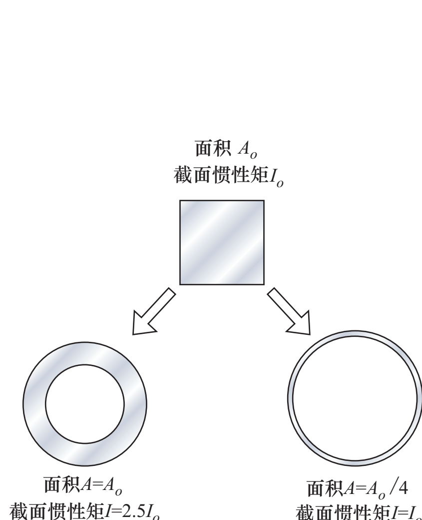


图 9.4 截面形状对弯曲刚度 *EI* 的影响

（以方形截面梁作为比较的基准，左边为相同截面积的圆管（刚度为方形截面梁的 2.5 倍），右边为相同刚度的圆管（质量只是方形截面梁的 1/4）。）

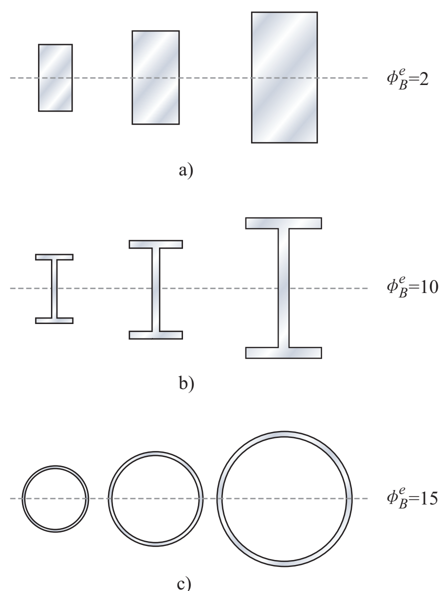


图 9.5 相同横截面形状具有相同的 ϕ_B^e 值

（$\phi_B^e=15$。同一组截面的大小不同，但形状相同。）

a）一组长方形截面，$\phi_B^e=2$ b）一组工字形截面，$\phi_B^e=10$ c）一组圆管截面

我们称 ϕ_B^e 为弹性弯曲形状因数。由于 I 的量纲与 A^2的量纲相同，弹性弯曲形状因数是一个无量纲数。该因数的大小只取决于形状，与尺寸无关。由图 9.5 可以看出，只要横截面形状相同，就具有相同的 ϕ_B^e 值。每一行的三个成员尺寸不同但是有着相同的形状因数——每个成员都是其临近成员的放大版或者缩小版。表 9.3 第一列给出了由表 9.2 中 A 和 I 的表达式计算得到的一些常用形状的形状因数 ϕ_B^e。实心等轴横截面（圆、正方形、六边形和八边形）ϕ_B^e 的值均接近于 1。在实际使用时，通常将其设置为 1。但是如果横截面被拉长、中空或呈工字形时，情况将发生变化。薄壁管或细长工字形梁 ϕ_B^e 的值为 50，甚至更大。$\phi_B^e=50$ 的物理意义就是该类梁的刚度为等重实心梁的 50 倍。

图 9.6 是 I 与 A 的关系图，图中给出了对应 ϕ_B^e 的等高线。等高线 $\phi_B^e=1$ 对应方形参考截面梁。$\phi_B^e=10$ 和 $\phi_B^e=100$ 描述的是更为有效的形状（如左下方图标所示），其弯曲轴是水平的。高刚度并非适用于所有场合。对于弹簧、吊架、悬臂和缆绳等需发生变形且要求较高抗拉强度的结构，必须有较低的弯曲刚度。此时，我们需要较低的形

状效率。正如等高线 $\phi_B^e=0.1$ 和 $\phi_B^e=0.01$ 所示，我们可以在包含弯曲轴的平面内拉伸材料，使其成为板材或线材来实现上述目标。

表 9.2 惯性矩

截面形状	面积 A/m^2	截面惯性矩 I/m^4	扭转惯性矩 K/m^4	抗弯截面系数 Z/m^3	抗扭截面系数 Q/m^3
h, b	bh	$\frac{bh^3}{12}$	$\frac{bh^3}{3}\left(1-0.58\frac{b}{h}\right)$ $(h>b)$	$\frac{bh^2}{6}$	$\frac{b^2h^2}{(3h+1.8b)}$ $(h>b)$
a, a	$\frac{\sqrt{3}}{4}a^2$	$\frac{a^4}{32\sqrt{3}}$	$\frac{\sqrt{3}a^4}{80}$	$\frac{a^3}{32}$	$\frac{a^3}{20}$
$2r$	πr^2	$\frac{\pi}{4}r^4$	$\frac{\pi}{2}r^4$	$\frac{\pi}{4}r^3$	$\frac{\pi}{2}r^3$
$2a$, $2b$	πab	$\frac{\pi}{4}a^3b$	$\frac{\pi a^3b^3}{(a^2+b^2)}$	$\frac{\pi}{4}a^2b$	$\frac{\pi}{2}a^2b$ $(a<b)$
t, $2r_i$, $2r_o$	$\pi(r_0^2-r_i^2)$ $\approx 2\pi rt$	$\frac{\pi}{4}(r_o^4-r_i^4)$ $\approx \pi r^3t$	$\frac{\pi}{2}(r_o^4-r_i^4)$ $\approx 2\pi r^3t$	$\frac{\pi}{4r_o}(r_o^4-r_i^4)$ $\approx \pi r^2t$	$\frac{\pi}{2r_o}(r_o^4-r_i^4)$ $\approx 2\pi r^2t$
t, h, b	$2t(h+b)$ $(h,b\gg t)$	$\frac{1}{6}h^3t\left(1+3\frac{b}{h}\right)$	$\frac{2tb^2h^2}{(h+b)}\left(1-\frac{t}{h}\right)^4$	$\frac{1}{3}h^2t\left(1+3\frac{b}{h}\right)$	$2tbh\left(1-\frac{t}{h}\right)^2$
t, $2a$, $2b$	$\pi(a+b)t$ $(a,b\gg t)$	$\frac{\pi}{4}a^3t\left(1+\frac{3b}{a}\right)$	$\frac{4\pi(ab)^{5/2}t}{(a^2+b^2)}$	$\frac{\pi}{4}a^2t\left(1+\frac{3b}{a}\right)$	$2\pi t(a^3b)^{1/2}$ $(b>a)$
t, h_i, h_o, b	$b(h_o-h_i)$ $\approx 2bt$ $(h,b\gg t)$	$\frac{b}{12}(h_o^3-h_i^3)$ $\approx\frac{1}{2}bth_o^2$	—	$\frac{b}{6h_o}(h_o^3-h_i^3)$ $\approx bth_o$	—
t, $2t$, h, b	$2t(h+b)$ $(h,b\gg t)$	$\frac{1}{6}h^3t\left(1+3\frac{b}{h}\right)$	$\frac{2}{3}bt^3\left(1+4\frac{h}{b}\right)$	$\frac{1}{3}h^2t\left(1+3\frac{b}{h}\right)$	$\frac{2}{3}bt^2\left(1+4\frac{h}{b}\right)$
$2t$, $2t$, h	$2t(h+b)$ $(h,b\gg t)$	$\frac{t}{6}(h^3+4bt^2)$	$\frac{t^3}{3}(8b+h)$	$\frac{t}{3h}(h^3+4bt^2)$	$\frac{t^2}{3}(8b+h)$
$2t$, t, h, b	$2t(h+b)$ $(h,b\gg t)$	$\frac{t}{6}(h^3+4bt^2)$	$\frac{2}{3}ht^3\left(1+4\frac{b}{h}\right)$	$\frac{t}{3h}(h^3+4bt^2)$	$\frac{2}{3}ht^2\left(1+4\frac{b}{h}\right)$

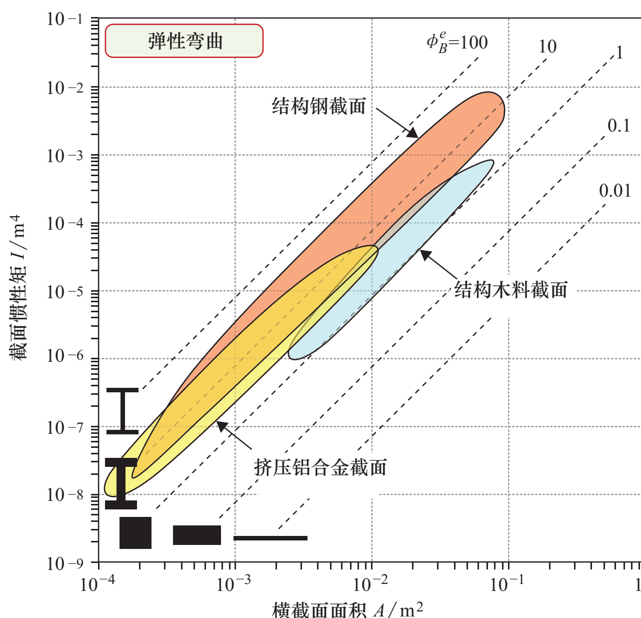


图 9.6　截面惯性矩 I 与横截面面积 A 的关系（对于高效率的结构，I/A^2 的比值较大；对于低效率的结构，该值较小。实际结构剖面的 I 和 A 值位于图中阴影区域。（注意：面积 A 和最大的形状效率 ϕ_B^e 均存在极限值，极限值取决于材料）。）

形状因数的计算

管的半径 $r=10$mm，壁厚 $t=1$mm。在弯曲条件下，其刚度比等面积实心截面圆柱体大多少？

答：两者的差异取决于其形状因数的比值。由表 9.3 可得，管的形状因数 $\phi_B^e=\frac{3}{\pi}\left(\frac{r}{t}\right)=9.55$，实心横截面的形状因数 $\phi_B^e=\frac{3}{\pi}=0.955$。因此，管的刚度是等面积实心圆截面的 10 倍。

2. 轴的弹性扭转（见图 9.3c）

有些形状能够很好地承受弯曲载荷，但它不一定能很好地承受扭转载荷。轴的刚度等于扭矩 T 除以扭转角度 θ，它与 GK 呈正比，其中 G 为剪切模量，K 为扭转惯性矩。对于圆形截面，K 与极惯性矩 J 相同：

$$J=\int_{\text{section}} r^2\,\mathrm{d}A \tag{9.4}$$

式中，dA 是距截面中心 r 处的微元面积。对于非圆形截面，$K<J$。它可以由扭转角 θ 与扭矩 T 的关系来确定：

$$S_T=\frac{T}{\theta}=\frac{KG}{L} \tag{9.5}$$

式中，L 为轴的长度；G 为材料的剪切模量。表 9.2 中给出了 K 的近似表达式。

与之前的定义类似，弹性扭转形状因数是截面扭转刚度 S_T 与相同长度 L、相等截

面积 A 的实心轴扭转刚度 S_{T_o} 的比值。借助式（9.5），可知：

$$\phi_T^e=\frac{S_T}{S_{T_o}}=\frac{K}{K_o} \tag{9.6}$$

实心方形截面的扭转惯性矩 K_o（表 9.2 中第一行，令 $b=h$）：

$$K_o=0.14A^2$$

可得：

$$\phi_T^e=7.14\frac{K}{A^2} \tag{9.7}$$

对于实心方形横截面，其值为 1。对于其他实心等轴截面，其值近似为 1。但是，对于薄壁类截面（例如管），该值很大。与前述结论一致，ϕ_T^e 相同的横截面仅仅是尺寸不同，形状是相同的。表 9.3 列出了由表 9.2 中 K 和 A 的表达式计算得出的值。

表 9.3　形状因数

截面形状	弯曲形状因数 ϕ_B^e	扭转形状因数 ϕ_T^e	弯曲失效形状因数 ϕ_B^f	扭转失效形状因数 ϕ_T^f
h；b	$\frac{h}{b}$	$2.38\frac{h}{b}\left(1-0.58\frac{b}{h}\right)$ $(h>b)$	$\left(\frac{h}{b}\right)^{0.5}$	$1.6\sqrt{\frac{b}{h}}\frac{1}{\left(1+0.6\frac{b}{h}\right)}$ $(h>b)$
a	$\frac{2}{\sqrt{3}}=1.15$	0.832	$\frac{3^{1/4}}{2}=0.658$	0.83
$2r$	$\frac{3}{\pi}=0.955$	1.14	$\frac{3}{2\sqrt{\pi}}=0.846$	1.35
$2a$；$2b$	$\frac{3}{\pi}\frac{a}{b}$	$\frac{2.28ab}{(a^2+b^2)}$	$\frac{3}{2\sqrt{\pi}}\sqrt{\frac{a}{b}}$	$1.35\sqrt{\frac{a}{b}}$ $(a<b)$
t；$2r_i$；$2r_o$	$\frac{3}{\pi}\left(\frac{r}{t}\right)$ $(r\gg t)$	$1.14\left(\frac{r}{t}\right)$	$\frac{3}{\sqrt{2\pi}}\sqrt{\frac{r}{t}}$	$1.91\sqrt{\frac{r}{t}}$
t；h；b	$\frac{1}{2}\frac{h}{t}\frac{(1+3b/h)}{(1+b/h)^2}$ $(h,b\gg t)$	$\frac{3.57b^2\left(1-\frac{t}{h}\right)^4}{th\left(1+\frac{b}{h}\right)^3}$	$\frac{1}{\sqrt{2}}\sqrt{\frac{h}{t}}\frac{\left(1+\frac{3b}{h}\right)}{\left(1+\frac{b}{h}\right)^{3/2}}$	$3.39\sqrt{\frac{h^2}{bt}}\frac{1}{\left(1+\frac{h}{b}\right)^{3/2}}$

（续）

截面形状	弯曲形状因数 ϕ_B^e	扭转形状因数 ϕ_T^e	弯曲失效形状因数 ϕ_B^f	扭转失效形状因数 ϕ_T^f
	$\frac{3}{\pi}\frac{a}{t}\frac{(1+3b/a)}{(1+b/a)^2}$ $(a,b\gg t)$	$\frac{9.12(ab)^{5/2}}{t(a^2+b^2)(a+b)^2}$	$\frac{3}{2\sqrt{\pi}}\sqrt{\frac{a}{t}}\frac{\left(1+\frac{3b}{a}\right)}{\left(1+\frac{b}{a}\right)^{3/2}}$	$5.41\sqrt{\frac{a}{t}}\frac{1}{\left(1+\frac{a}{b}\right)^{3/2}}$
	$\frac{3}{2}\frac{h_o^2}{bt}(h,b\gg t)$	—	$\frac{3}{\sqrt{2}}\frac{h_o}{\sqrt{bt}}$	—
	$\frac{1}{2}\frac{h}{t}\frac{(1+3b/h)}{(1+b/h)^2}$ $(h,b\gg t)$	$1.19\left(\frac{t}{b}\right)\frac{\left(1+\frac{4h}{b}\right)}{\left(1+\frac{h}{b}\right)^2}$	$\frac{1}{\sqrt{2}}\sqrt{\frac{h}{t}}\frac{\left(1+\frac{3b}{h}\right)}{\left(1+\frac{b}{h}\right)^{3/2}}$	$1.13\sqrt{\frac{t}{b}}\frac{\left(1+\frac{4h}{b}\right)}{\left(1+\frac{h}{b}\right)^{3/2}}$
	$\frac{1}{2}\frac{h}{t}\frac{(1+4bt^2/h^3)}{(1+b/h)^2}$ (h,b,t)	$0.595\left(\frac{t}{h}\right)\frac{\left(1+\frac{8b}{h}\right)}{\left(1+\frac{b}{h}\right)^2}$	$\frac{3}{4}\sqrt{\frac{h}{t}}\frac{\left(1+\frac{4bt^2}{h^3}\right)}{\left(1+\frac{b}{h}\right)^{3/2}}$	$0.565\sqrt{\frac{t}{h}}\frac{\left(1+\frac{8b}{h}\right)}{\left(1+\frac{b}{h}\right)^{3/2}}$
	$\frac{1}{2}\frac{h}{t}\frac{(1+4bt^2/h^3)}{(1+b/h)^2}$ $(h,b\gg t)$	$1.19\left(\frac{t}{h}\right)\frac{\left(1+\frac{4b}{h}\right)}{\left(1+\frac{b}{h}\right)^2}$	$\frac{3}{4}\sqrt{\frac{h}{t}}\frac{\left(1+\frac{4bt^2}{h^3}\right)}{\left(1+\frac{b}{h}\right)^{3/2}}$	$1.13\sqrt{\frac{t}{h}}\frac{\left(1+\frac{4b}{h}\right)}{\left(1+\frac{b}{h}\right)^{3/2}}$

3. 弯曲失效

当某处应力首先达到屈服强度 σ_y 时，材料开始发生塑性变形。当应力首先达到断裂强度 σ_{fr}时，材料发生断裂；当应力超过疲劳极限 σ_e 时，材料发生疲劳失效。在前几章中我们用符号 σ_f 来表示失效应力，即指导致开始出现屈服、断裂或疲劳失效的局部应力。

在弯曲过程中，离中性轴最远的梁表面点 γ_m 处应力 σ 最大，其值为

$$\sigma=\frac{M\gamma_m}{I}=\frac{M}{Z} \tag{9.8}$$

式中，M 是弯矩。当该应力值超过 σ_f 时，材料便发生失效。因此，在梁的失效问题中，形状的效率由截面系数来体现，截面系数 $Z=I/\gamma_m$。ϕ_B^f 由比值 Z/Z_o 来衡量，其中 Z_o 为等截面积的方形参考梁的截面系数：

$$Z_o=\frac{b_o^3}{6}=\frac{A^{3/2}}{6} \tag{9.9}$$

$$\phi_B^f=\frac{Z}{Z_o}=\frac{6Z}{A^{3/2}} \tag{9.10}$$

类似于其他的形状因数，ϕ_B^f 无量纲，因此与尺寸无关。$\phi_B^f=1$ 描述的是方形截面参考梁。表 9.3 给出了其他形状的 ϕ_B^f 的表达式，由表 9.2 中的截面系数 Z 推导而来。在承受弯曲载荷时，一个失效形状因数为 10 的梁比等截面积实心截面的抗弯强度大 10 倍。图 9.7 给出了 Z 与 A 的关系，以及基于式(9.10)得到的 ϕ_B^f 值。图中不同的等高线对应不同的形状效率值（由图标可知）。

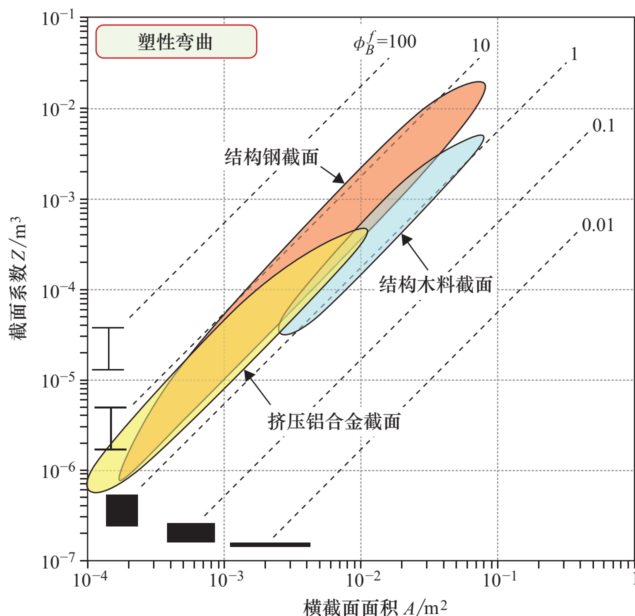


图 9.7　截面系数 Z 与横截面面积 A 的关系（对于高效率的结构，$Z/A^{3/2}$ 的值较大；对于低效率的结构（易于弯曲的结构），该值较低。实际结构剖面的 Z 与 A 位于图中阴影区域。（注意：面积 A 和最大的形状效率 ϕ_B^f 均存在极限值，极限值取决于材料）。）

形状因数评估

一根高度 $h=100\text{mm}$，宽度 $b=100\text{mm}$，壁厚 $t=5\text{mm}$ 的方形管截面梁，其形状因数 ϕ_B^f 的值是多少？

答：由表 9.3 可知，方形管截面的形状因数 $\phi_B^f=\dfrac{1}{\sqrt{2}}\sqrt{\dfrac{h}{t}}\dfrac{\left(1+\dfrac{3b}{h}\right)}{\left(1+\dfrac{b}{h}\right)^{\frac{3}{2}}}=4.47$。方形管截面梁的强度是等截面实心方形截面梁强度的 4.5 倍。

4. 扭转失效

扭转的问题更为复杂。承受扭矩 T（见图 9.3c）的圆形棒材或者管材，外表面的剪切应力 τ 最大。距扭转轴 r_m 处的剪切应力为：

$$\tau=\frac{Tr_m}{J}\tag{9.11}$$

J/r_m 与弯曲中的 I/γ_m 具有相同的特点。对于非圆形横截面发生自由扭转时，最大

的表面应力为：

$$\tau=\frac{T}{Q} \tag{9.12}$$

式中，Q（单位为 m^3）在扭转中的角色等同于 Z 在弯曲中的角色。因此，扭转失效形状因数 ϕ_T^f 的定义方式与弯曲中的定义方式相同，表达式为：

$$\phi_T^f=\frac{Q}{Q_o}=4.8\frac{Q}{A^{3/2}} \tag{9.13}$$

表 9.2 和表 9.3 中给出了 Q 与 ϕ_T^f 的值。实心等轴截面轴的 ϕ_T^f 值接近于 1。

完全塑性弯曲或扭转（即截面所有区域的应力都超过屈服强度）涉及另外一对形状因数。一般来说，能够很好抑制塑性发生的形状，也能很好地抑制完全塑性，因此 ϕ_B^{pl} 与 ϕ_B^f 的差异不大。从这个角度来讲，眼下无须讨论新的形状因数。

5. 轴向加载：柱状失稳

长度为 L 的柱体，当压缩载荷大于欧拉载荷时，就会发生弹性失稳。欧拉载荷的表达式为：

$$F_c=\frac{n^2\pi^2EI_{\min}}{L^2} \tag{9.14}$$

式中，n 是一个取决于终端约束的常数值。抗失稳能力取决于最小截面惯性矩 $I_{\min}$。同样，将式(9.3)中的 I 用 $I_{\min}$ 来替换，可获得合理的弹性弯曲形状因数 ϕ_B^e。

9.3 形状效率的限制条件

目前为止，结论是这样的。如果想要设计高效率的结构（使用尽可能少的材料），只要将形状因数设计的尽可能大即可。看起来似乎 ϕ 值越大越好，确实是这样，但形状因数的取值是受限的。接下来我们将作详细介绍。

形状致强度增加

一个高度为 L 的细长实心圆柱体承受载荷 F。如果过载，圆柱体将会发生弹性失稳。如果将实心圆柱体由具有相同截面积的中空圆管代替，那么其承载能力将增加多少？

答：将式(9.14)中的 $I_{\min}$ 用式(9.3)中的 $\phi_B^eA^2/12$ 代入，得：

$$F_c=\frac{n^2\pi^2A^2}{12L^2}E\phi_B^e$$

失效载荷的增长率为圆管的形状因数相对于实心圆柱体的形状因数的比值。薄壁管的形状因数 $\phi_B^e=3r/\pi t$；对于实心圆柱体，$\phi_B^e=3/\pi$（见表 9.3）。两者的比值为 r/t。其中，r 为半径；t 为壁厚。

1. 经验限制

实际上，截面的细长程度是有限度的，由此决定了材料可获得的最大效率。这些

限制有的来自于加工约束，如制造难度太大或成本太高。更多时候，这些限制源于材料自身的属性，因为属性决定了材料的失效形式。我们从两个方面来探讨这些约束条件。首先是基于经验的，检验形状的材料组成（如钢和铝等），记录可用截面的极限效率。其次是基于形状截面的力学稳定性分析。

梁、轴和柱的标准截面通常是棱形。棱形可通过轧制、挤压、拉拔、拉挤或者锯切（见图 9.0）方式来制备。截面可以是实心的、中空的（如管或盒），或者外空的（如 I 形、U 形和 L 形截面）。每一类形状都可以由相应的材料加工而成。其中一些截面已成为标准常备截面，主要用于结构钢、挤压铝合金、拉挤 GFRP（玻璃纤维增强塑料或环氧树脂）或结构木材。图 9.8 所示的是由这四种材料组成的 1880 种标准截面的 I 和 A 值，图上标有对应形状因数 ϕ_B^e 的等高线。对于实心圆形或正方形截面，$\phi_B^e\approx1$。有趣的是，没有哪个截面的 ϕ_B^e 值大于 65，这是所有截面形状因数的上限。图 9.7 给出了 Z 和 A 的关系，其中 ϕ_B^f 的上限约为 15。当把这些数据按不同的材料进行分类后，我们发现每种材料有其各自的上限值，且差异很大。对于扭转形状因数，也存在类似特点。表 9.4 给出了具体的上限数值，对应图 9.6 和图 9.7 中的阴影区域。

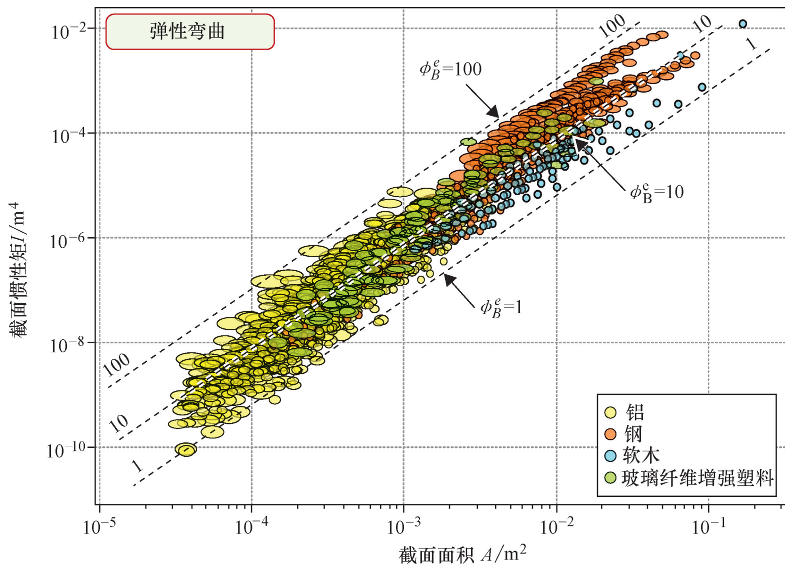


图 9.8 钢、铝、玻璃纤维增强塑料和木料的截面惯性矩 I 与截面面积 A 的对数关系图（图中给出了 ϕ_B^e 的等高线，显示其存在上限值。与 Z 与 A 的对数关系图中存在 ϕ_B^f 的上限值相似。）

表 9.4 形状因数的经验上限值 ϕ_B^e，ϕ_T^e，ϕ_B^f 和 ϕ_T^f

材料	$(\phi_B^e)_{max}$	$(\phi_T^e)_{max}$	$(\phi_B^f)_{max}$	$(\phi_T^f)_{max}$
结构钢	65	25	13	7
6061 铝合金	44	31	10	8
GFRP 和 CFRP	39	26	9	7
聚合物(例如:尼龙)	12	8	5	4
木材(实心)	5	1	3	1
弹性体	<6	3	—	—

形状效率的上限值是极其重要的，是轻量化结构设计的核心，不管是出于轻质的

目的，还是为了其他的原因（或许是成本）。由此就产生了两个问题。是什么决定了形状因数的上限？为什么上限值取决于材料？一种简单的解释是制造条件的约束。举例来说，钢可以拉拔成薄壁管或通过轧制、折叠或焊接成高效的工字形截面，通常其形状因数高达 50。然而，木料就很难成形。从理论上来讲，胶合板技术可用来制造薄壁管或工字形截面，但实际上其形状系数 ϕ_B^e 值很难超过 5。同样，将复合材料加工成薄壁棱柱形也是非常困难的，尽管已存在这样的加工技术。

当然，对于形状效率而言，一个更为根本的限制在于局部失稳。

2. 局部失稳限制

若高效率的形状可以被加工出来，效率的限制就由失效模式所决定。低效率截面的失效很简单，主要为屈服、断裂或大尺度屈曲。为寻求更高的效率，就要选择合适的形状以提高其简单失效所需的载荷。但这样做的话，该结构的承载情况会发生变化，此时以局部失稳为主的失效模式将起主导作用。

当截面接近其极限效率时，一个典型特征就是，两种或多种失效模式在相同的载荷下同时发生。为什么？下面是一种简单的解释。当失效由一种失效机制主导，且这种失效机制所需的载荷较其他失效机制所需的载荷均要小时，可以通过调整截面形状来抑制失效的发生。但是，这样会使得载荷上升，从而使得另一种失效机制起主导作用。如果将形状用单一变量 ϕ 来描述，当两种失效机制在相同的载荷下同时产生时，就不得不停止加载，即无法通过形状调整来改善。肋板或其他加强筋的添加能够提供额外的变量，使形状得以优化，但此处我们不作详述。

用一个简单的例子来解释上述问题。想象一个吸管，它是直径为 5mm 的薄壁中空管。它由聚苯乙烯构成，但是含量较低。如果将吸管收缩为实心圆柱，圆柱的直径将小于 1mm。因为聚苯乙烯的弹性模量较低，其弯曲刚度将很低。如果弯矩足够大，吸管将发生屈服；如果弯矩更大，将发生断裂失效。现在将其恢复到原先吸管的形状，然后施加弯曲载荷，刚度将比先前大大提高。但是，随着弯矩的增大，它逐渐呈椭圆形，然后毫无征兆地以折断方式突然发生失效。这是一种局部失稳的形式。

更为详尽的分析表明：不考虑加工限制的话，最大的实用形状效率实际上是由局部失稳的出现所决定的。厚壁截面梁承受弯曲载荷时，局部失稳前就已发生屈服。形状效率的提升可以通过增加细长比来实现，即增加 I 和 Z 值，使得其刚度和屈服前所能承受的载荷均增大。但与此同时，截面中细长比有所增加的薄壁处发生局部失稳所需的载荷有所降低。当发生局部失稳所需的载荷低于屈服所需的载荷时，材料将以失稳的形式发生失效。这不是我们想要的结果，因为失稳是一种缺陷，会导致突然的结构失效。由图 9.8 可知，实际截面的设计均需设置形状效率的上限，以避免局部失稳的发生。不难得出，极限值取决于材料种类。低强度和高弹性模量的材料易于屈服但不易失稳，反之亦然。近似法则可表示为：

$$(\phi_B^e)_{\max} \approx 2.3\left(\frac{E}{\sigma_f}\right)^{1/2} \tag{9.15a}$$

$$(\phi_B^f)_{\max} \approx \sqrt{(\phi_B^e)_{\max}} \tag{9.15b}$$

上述表达式可以用来估算材料的最大形状效率。根据这些公式，木制品的形状效率可以比标准的木料截面要大得多。这种高效率可以借助胶合板技术来实现，但所形

成的截面不再是标准的。

如果加载条件已知，可借助加固件或肋板等方法来抑制局部失稳，从而获得更高的形状效率，直至失效或新的局部失稳模式出现。当然，这些又可以借助更高层次的结构来加以抑制。因而，最终的 ϕ 值仅仅受限于制造条件。但是，这样会使得材料与形状最佳组合的选择变得非常复杂。在本书中，式(9.15)将用于计算我们所需的最大形状效率。

9.4 材料—形状的最佳组合

1. 有限刚度设计

材料的弹性模量 E 与密度 ρ 性能图标识了材料的特性。图 9.6 所示的形状效率图给出了形状对弯曲刚度的影响。如果将上述两张图结合起来，就可以评估截面的性能。在图 9.9 中，材料性能图（这里做了简化，仅保留几种材料）位于左上角，形状效率图位于右下角。

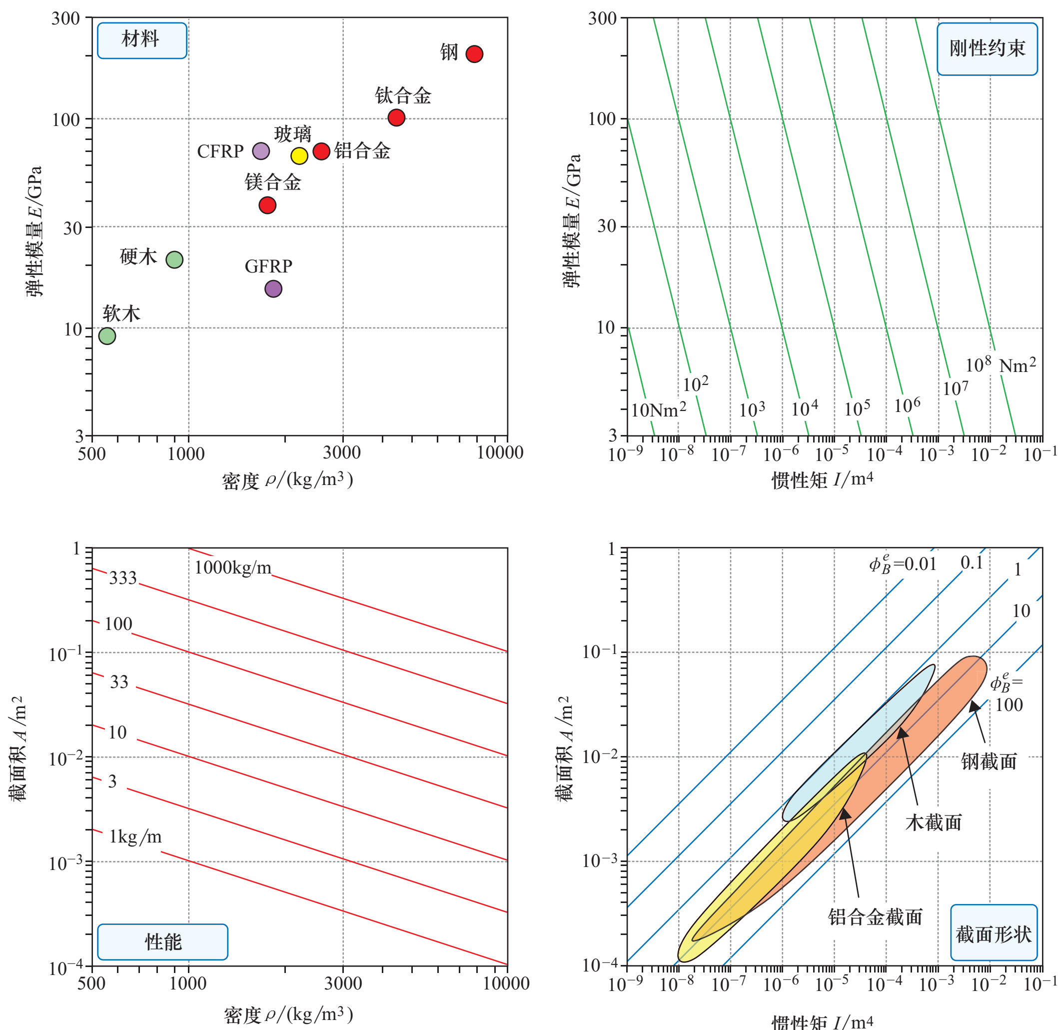


图 9.9 四象限图集，可用于有限弯曲刚度设计中的截面探索（每张图与其相邻的图共用相同的坐标轴。）

与前文有所不同，形状效率图的两坐标轴作了互换，惯性矩 I 在横轴上，而截面积 A 在纵轴上。图中阴影带表示聚集区，源于图 9.8 这类图。剩余的两个象限自动形成另外两张图，每张图分别与前述两张图共用一个坐标轴。因此，右上角图的坐标轴分别为 E 和 I，对角线对应的是截面 EI 的弯曲刚度；左下角图的坐标轴分别为 A 和 ρ，对角等高线对应性能指标，即单位长度的截面质量 $m_l=\rho A$。

这组图集可以很好地用于有限刚度截面的评估与比较。这组图有很多应用，下面这种是最典型的应用方式。图 9.10 给出了应用示意图。

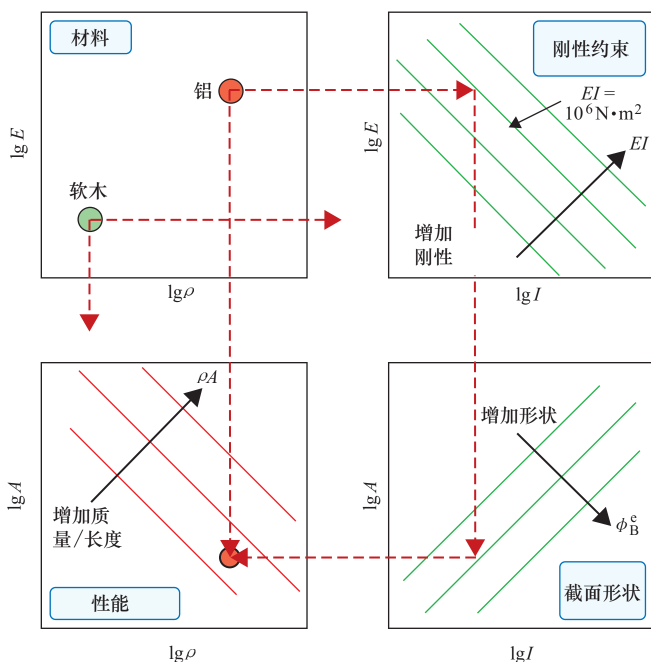


图 9.10 四象限图集的应用示意图

◇ 选择一种截面材料，在第一象限的材料特性图中找到对应其弹性模量 E 和密度 ρ 的点。

◇ 选择需要的截面刚度（EI），这是截面必须满足的约束条件。过材料的特性 E 值作水平线，直至第二象限刚度约束图中相应的等高线处。

◇ 过水平线与等高线交点做竖直线，并延长至第三象限横截面形状图，与对应截面形状因数 ϕ_B^e 的等高线相交于一点。

◇ 过该交点继续做水平线，延长至第四象限的性能图表。同时，在材料特性图中过材料的密度 ρ 值作竖直线，并延长至第四象限，与之前水平线的交点即为单位长度的截面质量。

图 9.11 对比了 $\phi_B^e=10$ 的轧制钢和挤压铝截面及 $\phi_B^e=2$ 的木料截面，在弯曲刚度约束为$10^6\mathrm{N\cdot m}$ 条件下的截面质量。挤压铝截面可以制造最轻质的梁。令人惊讶的是，尽管钢的密度是木头的 12 倍，但对于给定弯曲刚度，一个高效的钢梁质量几乎与木梁相同。这是由于钢可以有很高的形状因数的缘故。

2. 有限强度设计

此处的推理过程与前面类似。在图 9.12 中，强度—密度（σ_f—ρ）材料性能图置

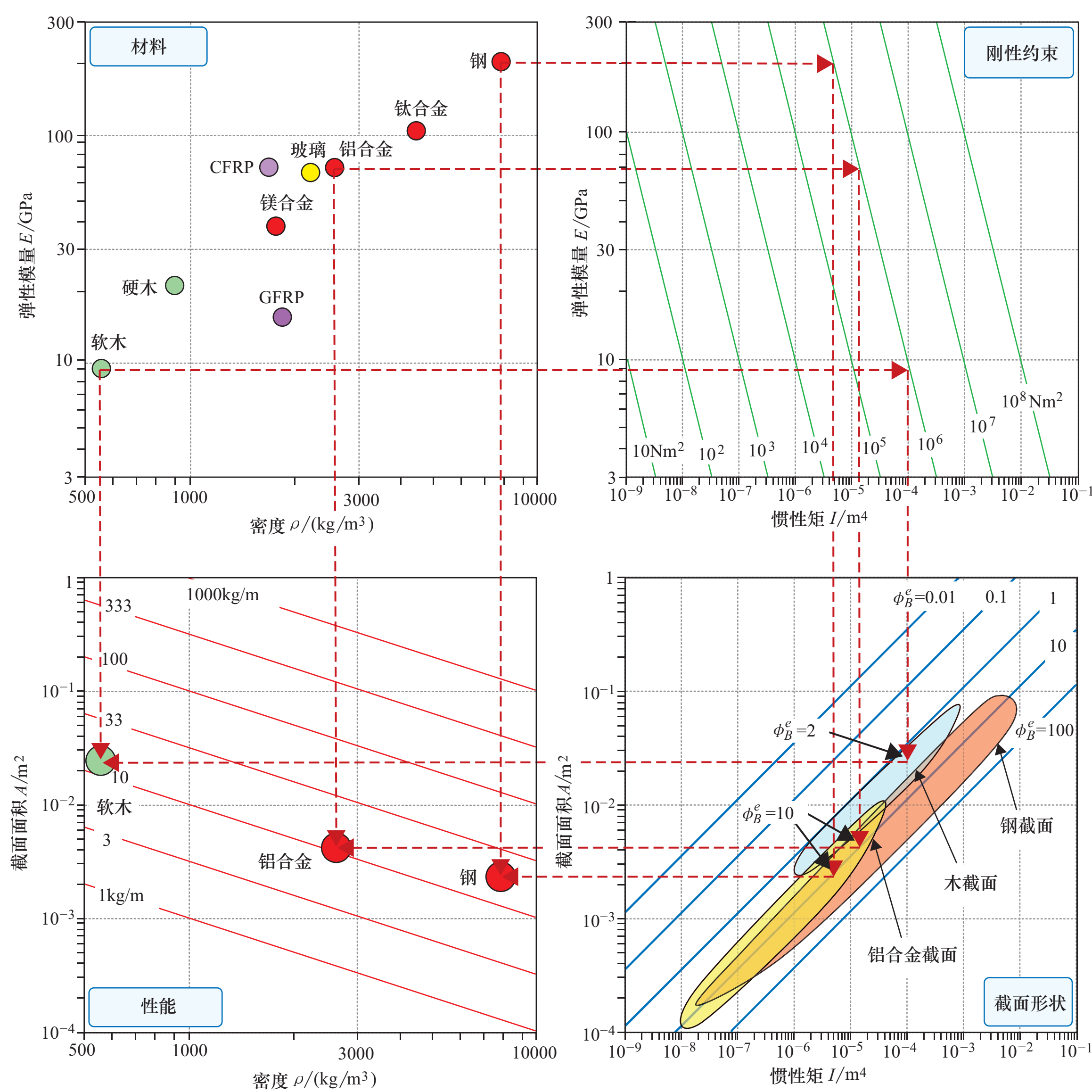


图 9.11 面向有限刚度设计（$EI=10^6\,\mathrm{N\cdot m^2}$），钢、铝和木料截面的比较

（单位长度的铝截面质量为 10kg/m，而钢几乎是其三倍。）

于左上角；Z-A 形状图（参考图 9.7，并将两坐标轴置换）位于右下角。与之前相同，剩余的两个象限生成另外两张图。右上角的强度约束图的坐标轴为 σ_f 和 Z，对角线对应截面的失效弯矩 $Z\sigma_f$。左下角的性能图与之前一样，坐标轴分别为 A 和 ρ，且对角等高线对应性能指标，即单位长度的截面质量 $m_l=\rho A$。

与有限刚度设计中的方法相同，对于给定的失效弯矩 $Z\sigma_f=10^4\,\mathrm{N\cdot m}$，对比 $\phi_B^f=15$ 的钢截面、$\phi_B^f=10$ 的铝截面和 $\phi_B^f=5$ 的 GFRP 的单位长度截面质量。基于四象限图集可知，GFRP 能提供质量最小的解决方案。

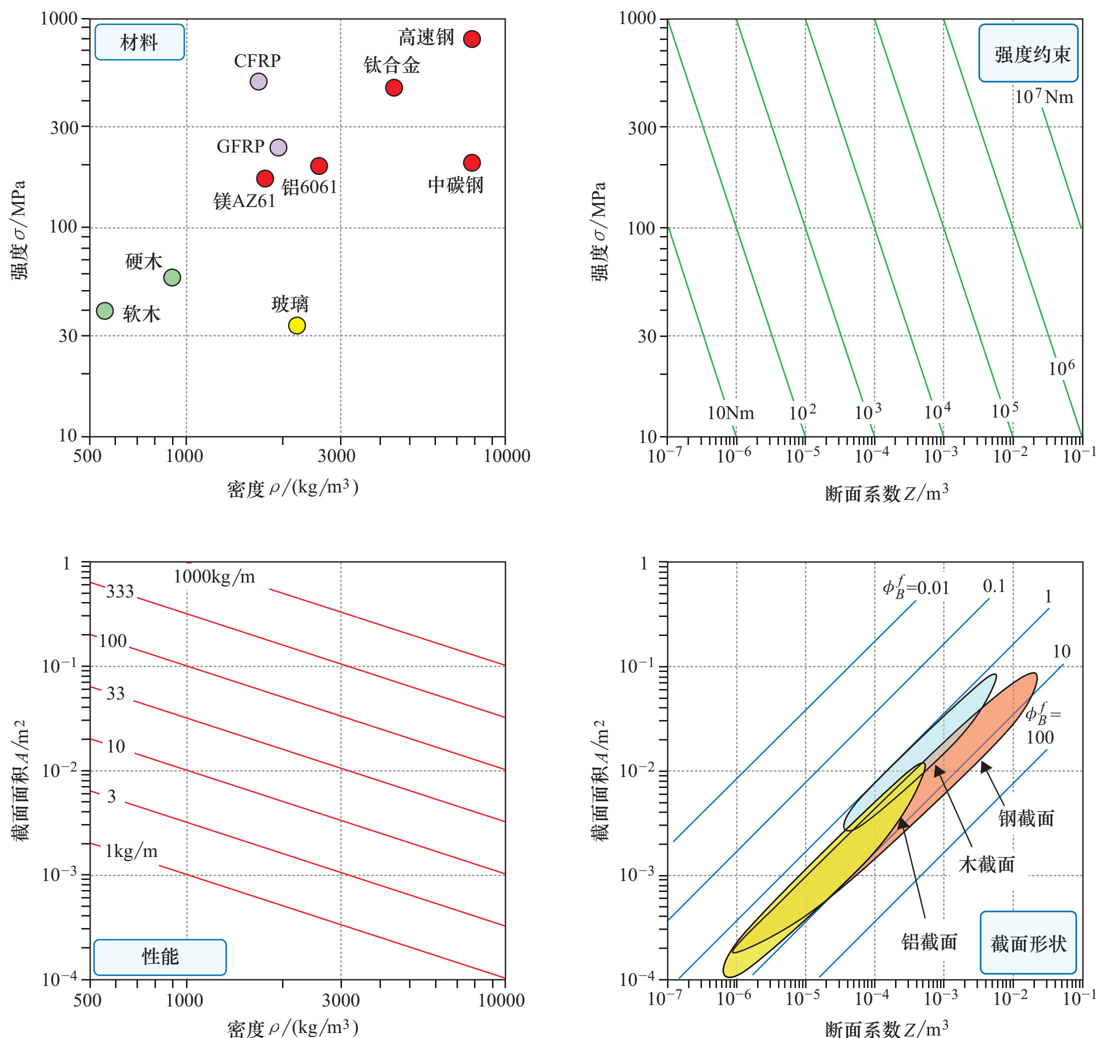


图 9.12　四象限图集，可用于有限强度设计中的截面探索

（每张图与其相邻的图共用相同的坐标轴。）

9.5　考虑形状因数的材料指标

由图 9.9 和图 9.12 所示的图集，将材料、形状、约束和性能表现以图的形式连接在了一起，尽管显得有点繁琐。除此以外，还有一种更为灵巧的办法，即按照第 5 章的方法构建相应的材料指标。大多数指标不需要这样的改良，其表现的优劣并不取决于形状，但是有限刚度和有限强度的设计却依赖于形状。因此，这类材料指标需进行改写，将形状因数考虑进来，从而描述材料与形状的最佳组合。

下面我们以最小质量设计这样一个案例来说明该方法。当然，也可以应用于其他的设计目标。推导过程与第 5 章一致，仅借助附加步骤将形状因数考虑进来。

1. 梁的弹性弯曲

给定梁的弯曲刚度为 S_B^*、长度为 L（约束条件），选择一种材料使其质量 m 最小

（设计目标）。长度为 L，截面为 A 的梁的质量 m 可以表示为：

$$m = AL\rho \tag{9.16}$$

弯曲刚度为：

$$S_B = C_1 \frac{EI}{L^3} \tag{9.17}$$

式中，C_1 是常数，仅仅取决于载荷的分布情况。利用式（9.3）中的 $\phi_B^e A^2/12$ 代替 I，有：

$$S_B = \frac{C_1 E}{12 L^3} \phi_B^e A^2 \tag{9.18}$$

采用上式可消去式（9.16）中的 A。代入目标刚度 S_B^*，可得梁的质量为：

$$m = \left(\frac{12 S_B^*}{C_1}\right)^{1/2} L^{5/2} \left[\frac{\rho}{(\phi_B^e E)^{1/2}}\right] \tag{9.19}$$

式（9.19）中除了方括号中的项以外，其余的都是给定的。方括号中的项取决于材料和形状。对于形状相同的梁（即相同的 ϕ_B^e 值），最好的选择就是 $E^{\frac{1}{2}}/\rho$ 值最大的材料（由第 5 章中的结果得到）。但是，如果想要最轻的材料-形状组合，则最好的选择对应指标 M_1 值最大的材料。

$$M_1 = \frac{(\phi_B^e E)^{1/2}}{\rho} \tag{9.20}$$

该指标可以来对材料—形状组合进行排名。下面，我们举例说明。

2. 轴的弹性扭转

轴的弹性扭转求解过程类似于梁的弹性弯曲问题。截面积为 A，长度为 L 的轴承受扭转载荷 T，扭转角为 θ。要求扭转刚度 $S_T = T/\theta$ 达到目标值 S_T^*，且轴的质量最小。扭转刚度为：

$$S_T = \frac{KG}{L} \tag{9.21}$$

式中，G 是剪切模量。将式(9.7)中的 ϕ_T^e 替换 K，得到：

$$S_T = \frac{G}{7.14L} \phi_T^e A^2 \tag{9.22}$$

利用上式将式(9.16)中的 A 消去，代入目标刚度 S_T^*，得到：

$$m = \left(7.14 \frac{S_T^*}{L^3}\right)^{1/2} L^{3/2} \left[\frac{\rho}{(\phi_T^e G)^{1/2}}\right] \tag{9.23}$$

最好的材料—形状组合，其 $\frac{(\phi_T^e G)^{1/2}}{\rho}$ 值应最大。

剪切模量 G 与弹性模量 E 密切相关。实际应用中，我们通常取 $G = 3E/8$。这样材料指标则变为：

$$M_2 = \frac{(\phi_T^e E)^{1/2}}{\rho} \tag{9.24}$$

对于相同形状的轴，材料指标可简化为 $E^{1/2}/\rho$。当轴的材料与形状都不同时，式（9.24）所示的材料指标可用于选择。

形状带来的效率增益

在刚性梁的设计中，需找到材料与形状的最佳组合，使其质量最小。表 9.5 中列出了四种材料的性能和常用形状。对于给定刚度，哪种材料—形状组合的质量最低呢？

答：表格倒数第二列给出了“固定形状”的简化指标 $E^{1/2}/\rho$。对于该指标，木料的值最大，是钢的两倍多。假如每种材料都能获得高效率的形状（表格最后一列给出了对应的材料指标），木料的材料指标值最低，甚至钢还要好一些。最终的结果是铝合金优于钢和 GFRP，成为最好的选择。

表 9.5 轻质刚性梁的材料与形状选择

材料	$\rho/(\mathrm{Mg/m^3})$	E/GPa	ϕ_B^f	$E^{1/2}/\rho$	$(\phi_B^e E)^{1/2}/\rho$
1020 钢	7.85	205	20	1.8	8.2
6061-T4 铝	2.7	70	15	3.1	12.0
GFRP（各向同性）	1.75	28	8	2.9	8.5
木材（橡木）	0.9	13.5	2	4.1	5.8

式（9.19）和式（9.23）给出了一种可用于桥以及桁架这类复杂结构的形状因数计算方法。举例来说，将式（9.19）进行变换后，可得到：

$$\phi_B^e = \frac{12S_B}{C_1}\frac{L^5}{m^2}\frac{\rho^2}{E} \tag{9.25}$$

当结构的质量、长度以及弯曲刚度（针对大的桥梁跨度）已知，材料的密度和模量也已知，结构的形状因数可以基于上式计算得到。对于现有的桥梁跨度，形状因数值介于 50~200。这比表 9.4 给出的最大值还要大，因为桥是“结构化的结构”，有两个甚至更多的结构层次。可见，ϕ 值的增加可以利用结构层次来实现。

基于试验数据计算形状因数

带有复杂加强肋的中空管状挤压铝型材的单位长度质量 $m_l=0.3\mathrm{kg/m}$。长度 $L=1\mathrm{m}$ 的挤压件，受三点弯曲载荷，中心载荷 $W=10\mathrm{kg}$，中点处挠度为 $\delta=2\mathrm{mm}$。该挤压件的截面形状因数 ϕ_B^e 是多少？（对于铝，弹性模量 $E=70\mathrm{GPa}$，密度 $\rho=2700\mathrm{kg/m^3}$；参考附录 A，对于三点弯曲问题，$C_1=48$）

答：作用力 $F=Wg=98.1\mathrm{N}$，梁的刚度 $S_B=\dfrac{F}{\delta}=4.9\times10^4\mathrm{N/m}$。将相关数据代入式（9.25）可得 $\phi_B^e=13.2$。

3. 梁和轴的失效

分析过程是相同的。长度为 L 的梁，承受弯曲载荷 F 而不失效，且梁的质量应尽可能地小。当截面形状是变量时，最佳选择的求解过程如下所述。如果弯矩超过下式的 M 值，则材料发生失效。

$$M = Z\sigma_f$$

式中，Z 是横截面模量；σ_f 是发生失效时的应力。用式（9.10）中的形状因数替换 Z，可得到：

$$M = \frac{\sigma_f}{6}\phi_B^f A^{3/2} \tag{9.26}$$

将其代入式（9.16），消去 A，梁的质量为：

$$m = (6M)^{2/3} L \left(\frac{\rho^{3/2}}{\phi_B^f \sigma_f}\right)^{2/3} \tag{9.27}$$

材料—形状的最佳组合对应材料指标 M_3 的值最大：

$$M_3 = \frac{(\phi_B^f \sigma_f)^{2/3}}{\rho} \tag{9.28}$$

对于扭转失效进行相似的分析，可得：

$$M_4 = \frac{(\phi_T^f \sigma_f)^{2/3}}{\rho} \tag{9.29}$$

材料—形状的最佳组合

利用特定形状的材料制成质量最小的高强度梁。表 9.6 给出了四种材料的性能和形状因数。满足给定的抗弯强度，哪种组合制成的梁质量最小呢？

答：表格倒数第二列给出了“固定形状”的简化指标 $\sigma_f^{2/3}/\rho$。对于该指标，木料的值最大，超过钢材三倍多。假如每种材料都有各自的形状（表格最后一列给出了对应的材料指标），铝合金优于钢和 GFRP，成为最佳选择。

表 9.6　轻质高强度梁的材料与形状选择

材料	$\rho/(\mathrm{Mg/m^3})$	σ_f/MPa	ϕ_B^f	$\sigma_f^{2/3}/\rho$	$(\phi_B^f\sigma_f)^{2/3}/\rho$
1024 钢，正火	7.85	330	5	6.1	17.8
6061-T4 铝	2.7	110	4	8.5	21.4
GFRP SMC（各向同性）	2.0	80	3	9.3	19.3
木材（橡木），沿晶	0.9	50	1.5	15	19.7

当形状固定时，上述两个材料指标均退化为第 5 章中 $\sigma_f^{2/3}/\rho$ 的形式。但是，当材料与形状均为变量时，必须借助于完整的材料指标。

对于强度约束的选择遵循相同的步骤，利用式（9.28）所示的材料指标 M_3 来完成。

9.6　基于指标的图表选择法

将呈某种形状的材料添加至材料性能图表中后，所有的选择标准仍可以适用。接下来我们来看看它是如何运转的。

式（9.28）所示的弹性弯曲材料指标可改写为：

$$M_1=\frac{(\phi_B^e E)^{1/2}}{\rho}=\frac{(E/\phi_B^e)^{1/2}}{\rho/\phi_B^e}=\frac{E^{*1/2}}{\rho^*} \tag{9.30}$$

这个表达式假设：模量为 E、密度为 ρ 的材料，经结构化处理后，可以视为一种新材料，其弹性模量和密度分别为：

$$E^*=\frac{E}{\phi_B^e},\ \rho^*=\frac{\rho}{\phi_B^e} \tag{9.31}$$

图 9.13 给出了弹性模量 E 和密度 ρ 的关系的简图。上述新材料的性能E^* 和ρ^* 可以在图中进行标识。如图所示，引入形状因数（例如 $\phi_B^e=10$），使得材料 M 沿着斜率为 1 的线向左下方移动，从 E、ρ 位置移至 $E/10$、$\rho/10$ 处。图中选择标准的绘制与之前一样。例如，定值的 $E^{\frac{1}{2}}/\rho$ 指标是一条斜率为 2 的直线，在图中显示为虚线。形状的引入使得材料从低于该线移到了高于该线的位置，即其性能表现有所提高。轴的弹性扭曲可以用相同的方法来处理。

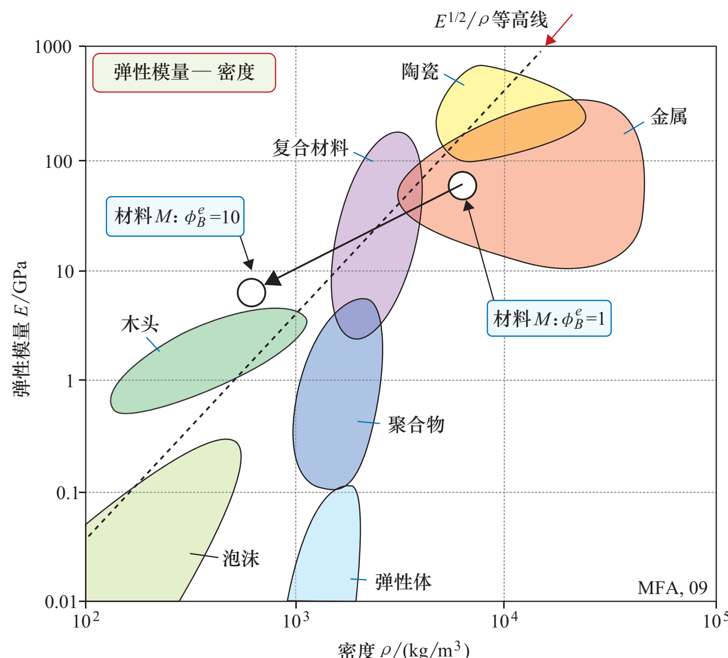


图 9.13 结构材料的表现如同一种弹性模量 $E^*=E/\phi_B^e$，密度 $\rho^*=\rho/\phi_B^e$的新材料，将材料从虚线选择线下方移至上方

（如文中所述，相似的处理过程可用于基于强度的弯曲梁设计。）

我们可以采用相同的方法基于强度而不是刚度来选择材料，使梁的质量最小。式（9.28）所示的弯曲失效材料指标可改写为：

$$M_3=\frac{(\phi_B^f\sigma_f)^{\frac{2}{3}}}{\rho}=\frac{(\sigma_f/(\phi_B^f)^2)^{\frac{2}{3}}}{\rho/(\phi_B^f)^2}=\frac{\sigma_f^{*2/3}}{\rho^*} \tag{9.32}$$

强度为 σ_f 和密度 ρ 的材料，一旦呈某种形状后，在承弯时可视作为一种新材料，其强度和密度分别为：

$$\sigma_f^* = \frac{\sigma_f}{(\phi_B^f)^2}, \qquad \rho^* = \frac{\rho}{(\phi_B^f)^2} \tag{9.33}$$

接下来的步骤就很就很简单了。引入形状因数（如 $\phi_B^f = 3$）使材料 M 沿着斜率为 1 的线向左下方移动，表现在图上，即从材料指标线（虚线）下的 σ_f、ρ 位置移至线上的 $\sigma_f/9$、$\rho/9$ 处，性能得以提升。在扭转失效中，可利用 ϕ_T^f 替换 ϕ_B^f 进行分析。

该方法的主要价值在于保持了原有材料性能图的通用性，可应用之前的选择标准来进行选择，正确识别出适用于轻质杆、梁和板的材料。

9.7 结构材料：微观形状

大自然的生存法则与结构效率密切相关。树木凭借纤维素资源长得最高，才得以获取所需要的阳光。动物依靠特定的羟磷灰排布，进化出最强健的骨骼结构，助其赢得大多数的斗争。如果是被捕食的动物而不是食肉动物，则跑得更快。因此，结构效率意味着适者生存。那么自然生物是如何做到的呢？这值得我们深入探讨。

1. 微观形状

结构效率既可以由表 9.2 和表 9.3 中所列宏观形状表征，也可以由微观尺度下的形状来衡量（见图 9.14）。木料就是一个例子：木料的实心部分由纤维素、木质素和其他聚合物的复合材料组成，将其塑造为小的棱形单元，使得固体部分远离树干或树枝的弯曲或扭转轴，从而同时增强刚度与强度。增加的效率可以用一组微观形状因数 ψ 来表征，其定义与之前的 ϕ 相似。微观形状的特点在于结构的重复性，即同一结构可不断扩展。就微观结构化实体而言，它也是一种材料，有对应的弹性模量、密度和强度等特性。假如形状相比于微观结构要大得多，那么它可以由微观结构组合而成，因此继承了微观结构的性能。举例来说，我们可以用木料来加工工字型梁，梁的截面既有宏观形状，又有微观形状（见图 9.15）。从某种意义上讲，木质工字形梁的总形状因数是木质结构的形状因数与工字梁形状因数的乘积，这个值将很大。

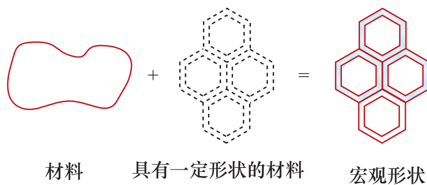


图 9.14 机械效率的提升可以通过材料与微观结构或内部结构的组合来实现（相应的宏观结构是由微观结构不断重复得以实现。形状效率由微观形状因数 ψ 来表征。）

许多天然材料都具有微观形状，木料只是其中的一个例子。骨骼、植物的茎和叶，以及墨鱼骨均具有高刚度低质量的结构。人造材料的例子比较难想到，尽管存在实现的可能性。图 9.16 给出了四种存在于自然界，由微观形状扩展的结构。第一种是六角棱柱单元的木质结构，当单元为正六棱形时，截面呈现各向同性。第二种是典型的棕榈木结构，强化纤维离散分布在泡沫基体中，该截面也呈现各向同性。第三种是将同心圆柱形壳体置于泡沫基体中形成的轴对称结构，一些植物的茎就具有这样的结构。第四种为层状结构，由大量的夹层板堆积而成，如同墨鱼的壳。

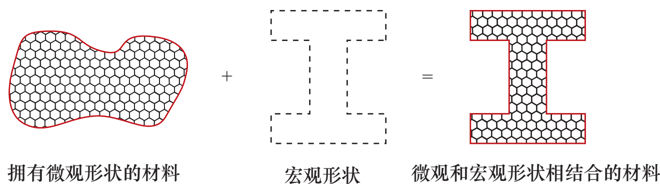


图 9.15 宏观形状与微观形状的结合可以得到高效的结构
（整体形状因数是微观形状因数和宏观形状因数的乘积）

2. 微观形状因数

这里我们来分析一下，将图 9.16 所示边长为 b_o 的实心方形截面梁，按恒定质量的原则利用图 9.16 所示四种结构中的任意一种将截面扩展至更大的方形截面，我们所能获得的弯曲刚度增量。原始实心梁的弯曲刚度 S_s 与弹性模量 E_s 和惯性矩 I_s 之积成正比：

$$S_s \propto E_s I_s \tag{9.34}$$

式中，下标 s 用于指代“实心梁的一个属性”，且 $I_s = b_o^4/12$。当梁在保持质量不变的情况下进行截面扩展，其密度从 ρ_s 下降为 ρ，而其边界长度从 b_o 变为 b，满足体积守恒原理：

$$b = \left(\frac{\rho_s}{\rho}\right)^{1/2} b_o \tag{9.35}$$

由此可知，其惯性矩从 I_s 变为 I，表达式如下：

$$I = \frac{b^4}{12} = \frac{1}{12}\left(\frac{\rho_s}{\rho}\right)^2 b_o^4 = \left(\frac{\rho_s}{\rho}\right)^2 I_s \tag{9.36}$$

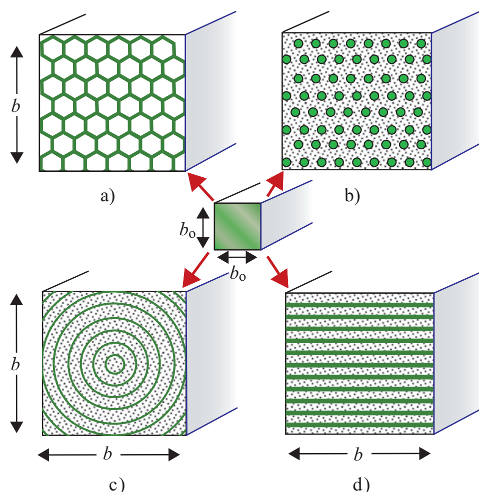


图 9.16 四种高效的扩展微观结构
a）棱柱单元 b）纤维嵌入泡沫基体 c）内嵌泡沫的同心圆柱形壳体 d）带泡沫隔层的平行板堆积

如果图 9.16a、b 和 c 所示的单元、纤维或圆环沿着与梁的中心轴相同的方向扩展，那么与轴平行的弹性模量将从 E_s 变为：

$$E = \left(\frac{\rho}{\rho_s}\right) E_s \tag{9.37}$$

扩展梁的弯曲刚度与 EI 成比例，因此其刚度与原始实心梁刚度的比值为：

$$\psi_B^e = \frac{S}{S_s} = \frac{EI}{E_s I_s} = \frac{\rho_s}{\rho} \tag{9.38}$$

我们称 ψ_B^e 为弹性弯曲微观形状因数。对于图 9.16a 所示的棱形结构，该值恰好是相对密度 ρ/ρ_s 的倒数。注意：当材料为实心体时密度达到极限，即 $\rho=\rho_s$，此时 ψ_B^f 的

值为 1。对于弯曲失效，采用相似的分析过程可得到其形状因数。

$$\psi_B^f = \left(\frac{\rho_s}{p}\right)^{1/2} \tag{9.39}$$

通常情况下，扭转相对复杂一些。图 9.16c 所示的结构呈圆对称，当其承受扭转载荷时，这些环可视作同心圆管。因此，有：

$$\psi_T^e = \frac{\rho_s}{\rho}, \psi_T^f = \left(\frac{\rho_s}{\rho}\right)^{1/2} \tag{9.40}$$

其他结构的扭转刚度和强度较低，因此微观形状因数也较小，其原因与工字形截面具有良好的抗弯性能，但在扭转中表现很差的原因是一样的。

结构化使得弹性模量为 E_s、强度为 $\sigma_{f,s}$ 的固体转变成弹性模量为 E、强度为 σ_f 的固体。如果将这个固体制成高效的宏观形状（如管或工字形截面），其弯曲刚度将增加 ϕ_B^e 倍。此时，梁的刚度变为：

$$S = \psi_B^e \phi_B^e S_s \tag{9.41}$$

即，形状因数可以简单相乘。对于强度而言，上述原则同样适用。

微观形状引起的刚度变化

如果一根梁最初为实心横截面，扩展至图 9.16 所示的棱柱形结构，那么其弯曲刚度将增加多少？如果将其扩展成满足 $E = \left(\frac{\rho}{\rho_s}\right)^2 E_s$ 关系的泡沫结构，那么弯曲刚度将增加多少？

答：式(9.38)给出的形状因数 ψ_B^e 描述了棱柱形微结构梁的刚度与等质量实心梁的比值。EI 的增长比例由 $\psi_B^e = \frac{\rho_s}{\rho}$ 决定。利用泡沫结构的弹性模量表达式，重复上述推导过程可知 $\psi_B^e = 1$。也就是说，泡沫结构的弯曲刚度没有增加。

上面这个例子很好地说明了结构层次及其优点。我们可以将其扩展到更广泛的情况。举例来说，可以将单个胞壁或夹层进行结构化，从而使得整体的形状因数得以第三次放大。而且，这些单元也是可以结构化的。大自然对此处理的得心应手且效果很好，但是人造结构就很难取得成效，主要归因于制造困难，给结构层次施加了难以逾越的经济约束，而且可靠性难以把握。如果结构在所有层次上都进行了优化，某一层某个单元的失效就会诱发上面层次的失效，导致“多米诺效应”，并最终引发整个结构的失效。结构越复杂，越难确保各层次的完整性。可以通过在每一级加入冗余（或者一个安全系数）来克服，但是这会导致效率的逐渐损失。因此，在实际应用中，一般采用两级结构。

正如之前所指出的，具有微型结构的材料可以视作一种新材料，有密度、强度、导热系数以及其他各种性能。只有当样品尺寸与单元尺寸相近时，属性会表现出尺寸效应，从而造成较大的困难。这意味着微观结构材料同样可以画在材料性能图上，且

第 5 章提出的所有选择标准可以毫无差别地用于微观结构材料。本书第 15 章将进一步拓展这种思路，在材料性能图中增加一系列天然材料。

9.8 本章小结

设计者可以通过改变两组变量，即材料性能和横截面形状，来优化承载结构的性能。两者并不是独立的。在具体应用中，最好的材料依赖于其可用的形状或可加工成的形状。

形状的贡献可以由四个形状因数来区分。第一个是 ϕ_B^e，用于梁的弹性弯曲和失稳；第二个是 ϕ_T^e，用于轴的弹性扭转；第三个是 ϕ_B^f，弯曲载荷下梁的塑性失效；最后一个是 ϕ_T^f，用于扭转轴的塑性失效（见表 9.7）。形状因数是一个无量纲数，用来表征材料在任意载荷形式下的使用效率。对于实心方形截面，它们的值被定义为 1。在这种定义下，所有的等轴实心截面（实心圆柱和六边形及其他多边形横截面）的形状因数均接近于 1。将材料分布在远离弯曲和扭转中心轴的区域（如工字形梁、中空管或中空方形截面等），其形状因数的值就大得多。本章表 9.3 给出了常用形状对应的形状因数值。

表 9.7 形状因数的定义

设计约束	弯曲	扭转
刚度	$\phi_B^e=\frac{12I}{A^2}$	$\phi_T^e=\frac{7.14K}{A^2}$
强度	$\phi_B^f=\frac{6Z}{A^{3/2}}$	$\phi_T^f=\frac{4.8Q}{A^{3/2}}$

注：其中 A、I、K、Z 和 Q 的定义见表 9.2。

实际上，一种材料能制成的形状不仅受制造条件的约束，同时需满足先屈服后局部失稳的限制。将这些约束添加到“形状图”中，结合材料性能图形成四象限图集（参考图 9.9 与图 9.12），可以很容易得到材料-形状的最佳组合。除了这种方法，我们还有一种更有效的方式，即包含形状因数的材料指标。对于给定弯曲刚度的轻质梁，最好的材料—形状组合，对应材料指标 M_1 的值最大。

$$M_1=\frac{(E\phi_B^e)^{1/2}}{\rho}$$

若是给定强度约束，则材料指标为：

$$M_3=\frac{(\phi_B^f\sigma_f)^{2/3}}{\rho}$$

这就使得形状截面可以在材料性能图上得以表征，并且按照第 5 章中的方法进行材料选择。同样，引入 ϕ_T^e 和 ϕ_T^f 的组合能获得满足刚度或强度要求的轻质轴。这里，“性能”优劣的标准指满足设计目标的质量最小化。还有一些材料–形状的组合需要最大化性能标准，如成本而非质量最小化或能量储备最大化。

选择材料—形状组合的过程最好举例来说明。下一章我们将给出相应的案例、形状选择的练习以及形状因数的应用。

9.9 扩展阅读

1） Ashby, M. F. (1991). Material and shape. *Acta Metall. Mater.*, 39, 1025-1039.

本章的想法源于这篇论文。

2） Birmingham, R. W., & Jobling, B. (1996). *Material selection: Comparative procedures and the significance of form. International Conference on Lightweight Materials in Naval Architecture*, The Royal Institution of Naval Architects, London.

本章中介绍了类似于图 9.12 和图 9.15 的四象限图表法。

3） Gerard, G. (1956). *Minimum weight analysis of compression structures.* New York University Press, Library of Congress Catalog Number 55-10052.

这本书以及后面引用的 Shanley 的书，建立了质量最小化设计的原理。不幸的是，两本书都不再重印，但可以在图书馆中找到。

4） Gere, J. M., &Timoshenko, S. P. (1985). *Mechanics of materials.* Wadsworth International.

关于弹性固体力学的介绍。

5）Gibson, L. J., &Ashby, M. F. (1997). *Cellular solids* (2nd ed.). Cambridge University Press, ISBN 0-521-49560-1.

非常全面的关于所有类型泡沫和多孔固体的结构与性能介绍的书籍。

6） Gibson, L. J., Ashby, M. F., & Hurley, B. (2010). *Cellular solids in nature.* Cambridge University Press, ISBN 978-0-521-19544-7.

探索自然界中的杂化材料。

7） Parkhouse, J. G. (1984). Structuring: a process of material dilution. In H. Nooshin (Ed.), *Proceedings of the Third International Conference on Space Structures* (pp. 367). Elsevier.

Parkhouse 提出了一种分析结构中材料效率的非常规方法。

8） Shanley, F. R. (1960). *Weight-strength analysis of aircraft structures.* (2nd ed.). Dover Publications, Library of Congress Catalog Number 60-501011.

这本书以及前面引用的 Gerard 的书，建立了质量最小化设计的原理。不幸的是，两本书都不再重印，但可以在图书馆中找到。

9） Timoshenko, S. P., &Gere, J. M. (1961). *Theory of elastic stability.* McGraw-Hill, Koge Kusha Ltd., Library of Congress Catalog Number 59-8568.

关于弹性屈曲的书籍。

10） Weaver, P. M., &Ashby, M. F. (1998). Material limits for shape efficiency. *Prog. Mat. Sci.*, 41, 61-128.

关于标准截面形状效率的综述，部分结果在本章中被用作弯曲和扭转的最大可用形状因数。

11） Young, W. C. (1989). *Roark's formulas for stress and strain* (6th ed.). McGraw-Hill, ISBN 0-07-100373-8.

一系列关于应力和应变的公式，分类记载了成千上万标准力学问题的解。

第 10 章

案例分析：材料与形状



图 10.0　两架采用轻质铝合金铰接框架的全电飞机

（感谢 Microlight Flying 杂志编辑 David Bremner 提供的照片）

10.1　引言

类似于第 6 章和第 8 章，本章也包括案例分析集，涉及形状因数、四象限图集和含形状因数材料指标的应用。它们的应用限于截面形状会直接影响性能表现的一类问题，在这类问题中零部件的基本功能是承受弯曲、扭转或屈曲载荷。

含形状因数的材料指标是进行材料与形状选择的有力工具。表 10.1 给出了一些重要的材料指标。选择过程如下：首先，确定候选材料及其可获得的或能被加工的截面形状；然后，将相关的材料性能和形状因数表格化，计算相应的材料指标；最后，指标值最大的组合即为最好的材料—形状组合。同样的信息也可以在材料选择图中加以描述，从而为这类问题提供了图形法求解手段，这种方法还能给出潜在的方案。

此外，该方法还有利于探讨天然材料（很多天然材料的形状效率极高）的进化方式。以竹子为例，它同时具有内在的微观结构和管状的宏观结构，使其具有非常良好的性能。接下来结合案例分析，我们将对此进行详细阐述。

表 10.1 考虑形状因数的材料指标：轻量化设计下的刚度—强度约束条件

零件形状、载荷、约束条件	刚度约束设计	强度约束设计
杆(拉伸部件) 载荷、刚度和长度指定,截面积任意	$\frac{E}{\rho}$	$\frac{\sigma_f}{\rho}$
梁(受弯曲载荷) 承受自重或附加载荷,刚度、强度和指定长度、截面形状和任意面积	$\frac{(\phi_B^e E)^{1/2}}{\rho}$	$\frac{(\phi_B^f \sigma_f)^{2/3}}{\rho}$
扭转的棒材或者管材 承受附加载荷,刚度、强度和指定长度、截面形状和任意面积	$\frac{(\phi_T^e E)^{1/2}}{\rho}$	$\frac{(\phi_T^f \sigma_f)^{2/3}}{\rho}$
柱(压杆) 屈曲导致坍塌或塑性破坏,强度和指定长度,截面形状和任意面积	$\frac{(\phi_B^e E)^{1/2}}{\rho}$	$\frac{\sigma_f}{\rho}$

其中,ϕ_B^e、ϕ_B^f 是弯曲形状因数;ϕ_T^e、ϕ_T^f 是扭转形状因数。为了节约成本,相应的指标中用 $C_m\rho$ 代替 ρ

10.2 人力飞机翼梁

大多数工程设计中，设计目标复杂多样，通常需要在性能与成本之间进行权衡。但是在飞机翼梁的设计中，其设计目标就比较简单。翼梁首先要尽可能地轻，且刚度必须足够大，以维持机翼的空气动力学效率。当记录即将被打破时，强度、可靠性甚至成本都可以变得无关紧要。图 10.1 所示的飞机有两个主翼梁。横向翼梁支撑机翼，纵向翼梁支撑尾翼，两者都主要受弯曲载荷。(此处我们忽略扭转作用，但实际是不能忽略的。)

大约 60 架人力飞机已成功试飞。第一代飞机所用的材料主要是巴尔杉木、云杉和丝织品。对于第二代飞机，铝管成为主要的承载结构。现在的第三代飞机使用碳纤维或环氧基树脂翼梁，可制成合适的形状。这种变化是如何产生的呢？将来又会怎样变化呢？

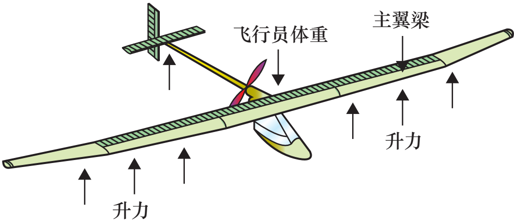


图 10.1 人力飞机主要靠两个翼梁来承载，横向翼梁支撑机翼，纵向翼梁支撑尾翼（两者的设计要求都是满足刚度要求的质量最小化。）

1. 解读和选择

选择材料与形状的最佳组合，使得满足给定弯曲刚度条件的翼梁质量最小（见表 10.2）。由表 10.1 可知，衡量该性能的材料指标为：

$$M_1 = \frac{(\phi_B^e E)^{1/2}}{\rho} \qquad (10.1)$$

表 10.3 上半部分列出了五种材料的数据。如果形状固定，M_1 简化为 $E^{1/2}/\rho$，相应的值列于表的第四列。巴尔杉木和云杉效率是极高的。这就是为什么模型飞机制造商现在还在使用它们，而真实飞机制造商在过去如此依赖它们的原因。实心 CFRP 的排名

较为靠前，钢和铝则远远地排在后面。

现在，考虑形状影响。表 10.3 第 5 列给出了五种材料的形状因数（数值均低于相应材料的最大值），横截面为常用市售截面。表格最后一列给出了实心矩形截面木料、方形截面铝以及方形截面 CFRP 的材料指标值。对比数据可知，铝比木料要好得多，CFRP 最好。

表 10.2 翼梁的设计要求

功能	翼梁
约束条件	指定刚度和长度
目标	质量最小
自由变量	材料选择、横截面形状及尺寸

表 10.3 翼梁材料

材料	弹性模量 E /GPa	密度 ρ /(kg/m^3)	指标*($E^{1/2}/\rho$) /[GPa$^{1/2}$/(Mg/m^3)]	形状因数 ϕ_B^e	指标 $^*M_1=[(\phi_B^e E)^{1/2}/\rho]$ /[GPa$^{1/2}$/(Mg/m^3)]
巴尔杉木	4.6	210	10	2	14
云杉	10.3	450	8	2	11
钢	205	7850	1.8	25	9
铝 7075T6	70	2700	3	25	15
CFRP	115	1550	7	10	22
铍	300	1840	9.3	15	36
铍 38%铝	185	2100	6.5	15	25
硼硅酸盐玻璃	63	2200	3.6	10	11

* 利用材料性能均值来计算指标值

借助第 9 章 9.6 节的方法，上述信息得以用图形化的方式呈现在图 10.2 中。每一种形状都可视为弹性模量 $E^*=\dfrac{E}{\phi_B^e}$、密度 $\rho*=\dfrac{\rho}{\phi_B^e}$的新材料。$E^*$ 和 ρ^* 的值也绘在图中。由此可以看出，形状因数 $\phi_B^e=25$ 的铝管和 $\phi_B^e=10$ 的空心方截面 CRFP 的优势是显而易见的。

2. 附言

为什么木料如此之好？即便不做任何形状处理，它也与呈某种形状的钢材的性能基本一致。那是因为木料自身就呈一定的形状。它的蜂窝状结构使其具有内在的微观形状，从而提升了其弯曲性能。这是自然界的鬼斧神工，其效率堪比工字梁。薄壁铝管拉拔技术的出现，使得铝管的形状因数可达到木料无法企及的程度，从而使其获得了性能优势，并被第二代人力飞机设计师所利用。但是，正如第 9 章所描述的那样，管壁太薄易发生折裂，因此设计者将铝管的形状因数上限值设为 40。对密度更低、弹

性模量更高的材料需求的日益增加，使得 CFRP 应运而生。呈高效形状的 CFRP，其性能表现远远超越其他材料。

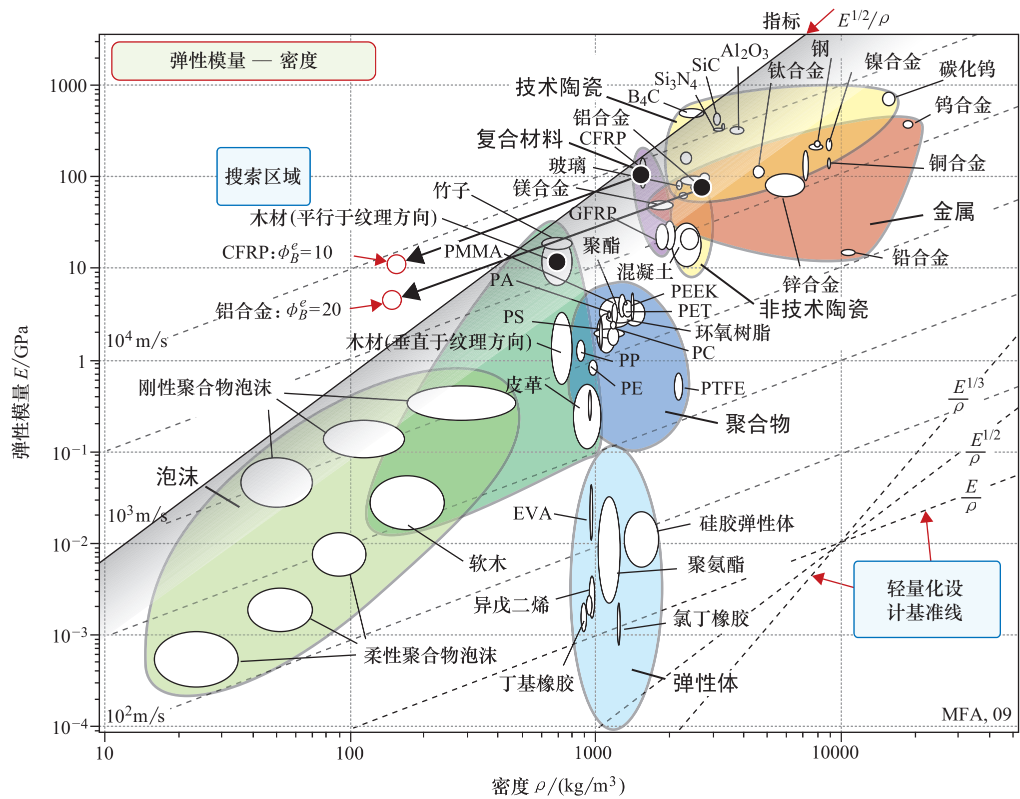


图 10.2 采用弹性模量 E—密度 ρ 图来选择飞机翼梁的材料与形状
（由形状因数为 10 的 CFRP 制成的翼梁性能优于由形状
因数为 20 的铝或形状因数接近于 1 的木料所制成的翼梁。）

我们还能进一步提升吗？很难，但值得尝试。本书第 11 章将给出设计材料组合的方法，所得到的材料组合性能优于其中任何一种材料。具体内容将在第 11 章中详细讨论。对于单一材料，我们应当如何处理呢？如果以 $E^{\frac{1}{2}}/\rho$ 为选择标准，我们将得到以钻石、硼、铍（一种航空用材料）为首的材料列表；紧随其后的是各种陶瓷，由于其易脆且成形难度大所以不可行；最底下的是镁和铝合金。但是在这之上，玻璃处于陶瓷对应的中间位置。一架翼梁由玻璃制成的滑翔机？听起来不可思议，但是转念一想，我们已有韧化玻璃、防弹玻璃和玻璃地板。可见，玻璃完全有能力作为结构材料，它极易成形且成本不高。

假设铍或玻璃可以制成一定形状，它们在性能方面能否超越 CFRP 呢？很难，但并非没有可能。根据理论公式（式（9.15a）），我们推测铍的形状因数可达到 60，玻璃能达到 30。更为实际一点的话，它们的形状因数分别达到 15 和 10 是完全有可能的。从表 10.3 下半部分给出的结果可知，当它们的形状因数达到上述数值的时候，铍的性能将远远超越 CFRP，但玻璃还做不到。当然这只是一种想法，想了解更多，详见第 12 章。

相关阅读：人力飞机

Bliesner, W. (1991). The design and construction details of the Marathon Eagle. In: Technology for human powered aircraft, *Proceedings of the Human-powered Aircraft Group Half Day Conference*. The Royal Aeronautical Society, London.

Details of another attempt to build a record-breaking plane.

Drela, M. & Langford, J. D (1985). Man-powered flight. *Scientific American*, p. 122.

A concise history of human-powered flight up to 1985.

Grosser, M (1981). *Gossamer odyssey*. Dover Publications, ISBN 0-486-26645-1.

Accounts of the Gossamer Condor and Albatross, which were attempts to capture the world record for human-powered flight.

Nadel, E. R., & Bussolari, S. R., (1988). The Daedalus project: physiological problems and solutions. *American Scientist*, July-August.

An account of the Daedalus project, a competition for human-powered flight from Crete and mainland Greece—the mythical route of Daedelus and his father.

Sherwin, K. (1971). *Man powered flight*. Model & Allied Publications, Argus Books Ltd.

Sherwin, K. (1976). *To fly like a bird*. Bailey Brothers & Swinfen Ltd., ISBN 561-00283-5.

相关案例：

见“建筑用结构材料”（见 6.5 节）、“竞赛用自行车前叉”（见 10.3 节）、“楼板搁栅：木材、竹子还是钢?”（见 10.4 节）。

10.3 竞赛用自行车前叉

自行车设计（见图 10.3）的第一要义是强度。当然，刚度也很重要，但是首要的设计标准是框架和前叉在正常使用状况下不会发生失效。前叉主要承受弯曲载荷。如果自行车是竞赛专用的，重量是首要考虑的因素，即前叉必须尽可能地轻。那么，最佳的材料与形状组合是什么呢?

1. 解读和选择

将前叉简化为长度 L 的梁，须承受最大载荷 P（均由设计要求决定）而不发生屈服或断裂（表 10.4）。前叉为管状，半径为 r，壁厚为 t，要求质量最小化。这里，我们将前叉视为轻质、高强度的梁。根据表 10.1 可知，其材料指标为：

$$M_2 = \frac{(\phi_B^f \sigma_f)^{2/3}}{\rho} \tag{10.2}$$

表 10.5 列出了 7 种候选材料及其性能。如果前叉为实心件，意味着 $\phi_B^f = 1$，云杉是最好的材料（见表最后一列第二行）。竹子呈天然的中空管状，宏观形状因数约为 2.2，使其抗弯强度比实心云杉（最后一列）要高得多。然而，当其他材料也考虑形状

效率时，排名发生了很大变化。表中给出的形状因数都可基于常规加工方法获得。钢的表现不错，钛 6-4 更好，最好的是 CFRP。尽管镁的密度很低，但强度不够，因而限制了它的应用范围。

2. 附言

表 10.5 所列的七种材料都曾用于自行车，其中六种材料制成的自行车现在仍可以买到。早期的自行车由木料制成；现代竞赛用自行车由钢、铝或 CFRP 制成，有些还用复合碳纤维，利用玻璃或芳纶纤维层来提高抗断裂能力；对于山地自行车来说，强度和抗冲击性能是极其重要的，这类自行车的前叉一般用钢或钛合金制成。

读者可能会有所疑惑：将一端承受法向载荷的直梁理论直接应用到锐角加载的弯曲梁上，这种简化是否可行？其实，无须惊慌。正如第 5 章 5.4 节所讲，当性能方程中描述功能要求（F）、几何形状（G）和材料（M）的变量是分离的，载荷与几何形状的细节只会影响 F 和 G，不会影响 M。也就是说，梁的曲度和加载的角度不会影响材料指标。材料指标仅仅与设计要求有关。

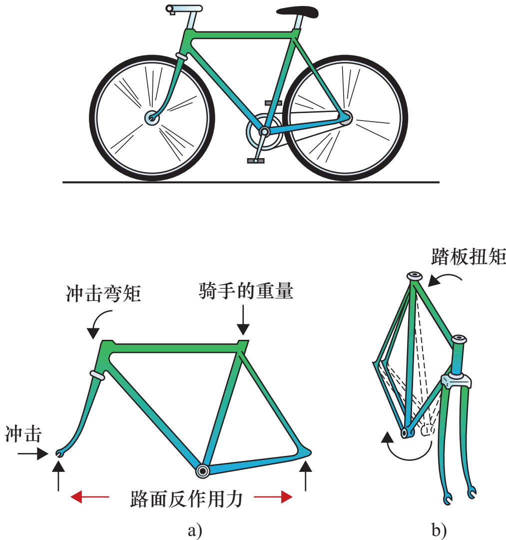


图 10.3　自行车，其前叉承受弯曲载荷（$(\phi_B^f\sigma_f)^{2/3}/\rho$ 值最大的材料与形状组合所制成的前叉满足强度要求，且质量最小。）

表 10.4　自行车前叉的设计要求

功　能	自行车前叉
约束条件	在设计载荷下不发生失效——强度约束
	给定长度
目标	最小质量
自由变量	材料选择
	横截面形状

表 10.5　自行车前叉的材料选择

材料	强度 σ_f /MPa	密度 ρ /(kg·m^{-3})	形状因数 ϕ_B^f	指标[$\sigma_f^{2/3}/\rho$] /[MPa$^{2/3}$/(Mg·m^{-3})]	指标[$(\phi_B^f\sigma_f)^{2/3}/\rho$] /[MPa$^{2/3}$/(Mg·m^{-3})]
云杉	75	450	1.5	39	51
竹子	70	700	2.2	24	41
钢(雷诺 531)	880	7850	7.5	12	46
铝(6061-T6)	250	2700	5.9	15	49
钛 6%Al-4%V	950	4420	5.9	22	72
镁 AZ61	165	1810	4.25	17	45
CFRP	375	1550	4.25	33	87

* 利用材料性能均值来计算指标值

相关阅读：

O liver, T. (1992). *Touring bikes, a practical guide*. Crowood Press, ISBN 1-85223-339-7.

A good source of information about bike materials and construction, with tables of data for the steels used in tube sets.

Sharp, A. (1979). *Bicycles and tricycles, an elementary treatise on therir design and construction.*

MIT Press, ISBN 0-262-69066-7.

A far-from-elementary treatise, despite its title, first published in 1977. *It is the place to look*

if you need the mechanics of bicycles.

Watson R., & Gray, M. (1978). *The Penguin book of the bicycle*. Penguin, ISBN 0-1400-4297-0.

Watson and Gray describe the history and use of bicycles. Not much on design. mechanics, or materials.

Whitt, F. R., & Wilson, D. G. (1982). *Bicycling science* (2nd ed.). The MIT Press, ISBN 0-262-73060-X.

A book by two MIT professorial bike enthusiasts, more easily digestible than Sharp, and with a good chapter on materials.

Wilson, D. G. (1986). A short history of human powered vehicles. *American Scientist*, 74, p. 350.

Typical *Scientific American* article: *good content, balance, and presentation. A. good starting point.*

Bike magazines such as Mountain Bike, Which Bike? *and* Cycling and Mountain Biking

carry extensive tables of available bikes and their characteristics—type, maker, cost, weight, gear set, etc.

相关案例：

见“建筑用结构材料”（见6.5节）、“人力飞机翼梁”（见10.2节）、“楼板搁栅：木材、竹子还是钢？”（见10.4节）。

10.4 楼板搁栅：木材、竹子还是钢？

楼板搁栅是置于两墙之上用于支撑楼板的梁结构（见图6.7和图10.4）。对于搁栅，它需要承受特定的弯曲载荷而不发生过弯或失效，且价格便宜。过去在欧美西方国家，搁栅都用截面高宽比为2∶1的矩形木料制成。根据表9.3可知，其弹性形状因数为2。在亚洲国家，小型建筑往往采用竹子，因其天然形状因数约为3.2。随着木料的日渐稀缺和建筑物的日益庞大，钢材逐渐取代木料和竹子，成为主要的结构材料。标准工字钢搁栅的形状因数介于5～25（特殊的工字钢甚至可以更高）。工字钢搁栅真就比木制搁栅更好吗？表10.6给出了搁栅的设计要求。

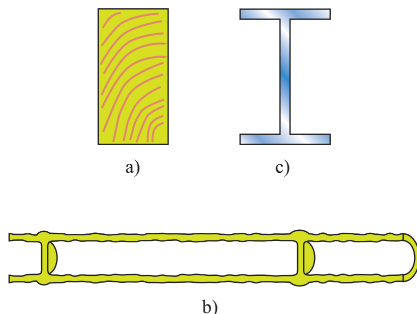


图10.4 木制梁（$\phi_B^e=2$）、工字钢梁（$\phi_B^e=10$）和竹子（天然形状因数 $\phi_B^e=3.2$）的横截面（形状因数的计算表达式见表9.3。）

1. 解读和选择

首先考虑刚度。对于给定刚度的梁，最便宜的梁对应的材料指标 M_1 值最大。将表10.1中对应指标中的 ρ 用 $C_m\rho$ 进行替换，即可得式（10.3）所示最小成本的指标：

$$M_1=\frac{(\phi_B^e E)^{1/2}}{C_m\rho} \qquad (10.3)$$

表10.7给出了三种材料的弹性模量 E、密度 ρ、成本 C_m 和形状因数 ϕ_B^e，同时给出了考虑形状和不考虑形状影响的两种材料指标值。$\phi_B^e=25$ 的钢梁对应的材料指标 M_1 比木料的稍大，意味着相同刚度条件下，钢梁成本要低一些。

但是强度呢？对于给定强度的轻质梁，其材料指标为：

$$M_2=\frac{(\phi_B^f \sigma_f)^{2/3}}{C_m\rho} \qquad (10.4)$$

表10.7给出了失效强度 σ_f、形状因数 ϕ_B^f 和指标 M_2 的值。对比可知，木制梁的性能甚至比最有效的工字钢梁还要好。

2. 附言

若考虑材料的性价比，标准木制梁和标准钢梁之间并没有太大差异。就通常情况而言，这是必然的结果，因为如果一种材料比另一种材料要好很多的话，另一种材料将被彻底淘汰。但是，进一步了解可以发现，木料、竹子和钢材分别占据了一定的市场板块。这是为什么呢？

木料和竹子对于一些国家来说是固有的，在当地生长，而钢材需要进口，因而增加了运输成本。安装木制梁比安装钢梁要容易得多；木料尺寸适应性更大，可以进行局部修剪，可以在任何部位钉钉子。木料是一种易于使用的材料。

但是，木料与人类一样，在漫漫时间长河中会发生很多变化，易受真菌、昆虫以及有锋利牙齿的小型哺乳动物的侵害。这些问题对于一些小型建筑，如普通家庭来说，是很容易克服的。但是，对于大型商业建筑物（如办公楼），其潜在的危险很大且很难修复。此时，通常采用钢材。

表 10.6　地板搁栅的设计要求

功能	地板搁栅
约束条件	长度、刚度和强度给定
目标	最小材料成本
自由变量	材料选择
	横截面形状

表 10.7a　地板搁栅材料选择

材料	密度 ρ /(kg/m³)	成本 C_m /($/kg)	弹性模量 E/GPa	抗弯强度 σ_f /MPa
木材(松树)	490	1.0	9.5	41
竹子	700	1.9	17	42
钢(1020)	7850	0.65	205	355

表 10.7b　地板搁栅指标

材料	形状因数 ϕ_B^e	形状因数 ϕ_B^f	指标 $E^{\frac{1}{2}}/(C_m\rho)$	指标 $M_1=(\phi_B^e E)^{1/2}/(C_m\rho)$	指标 $\sigma_f^{2/3}/(C_m\rho)$	指标 $M_2=(\phi_B^f E)^{2/3}/(C_m\rho)$
木料(松树)	2	1.4	6.3	8.9	24	30
竹子	3.2	2	3.1	5.5	9	14
钢(1020)	15	4	2.8	11	9.8	25

相关阅读：

Cowan, H. J., & Smith, P. R. (1988). *The science and technology of building materials*. Van Nostrand, ISBN 0-442-21799-4.

A broad survey of materials for the structure, cladding, insulation, and interior surfacing of buildings—an excellent introduction to the subject.

Farrelly, D. (1984). *The book of bamboo*. Sierra Club Books, ISBN 0-87156-825-X.

An introduction to bamboo and its many varieties.

Janssen, J. J. (1995). *Building with bamboo: A handbook*. Practical Action, ISBN 1-85339-203-0.

Bamboo remains a building material of great importance, as well as the material of floor-

ing, matting, and basketmaking. The techniques of building with bamboo have a long history, documented here.

相关案例：

见“建筑用结构材料”（见 6.5 节）、“人力飞机翼梁”（见 10.2 节）、“竞赛用自行车前叉”（见 10.3 节）。

10.5 再论桌腿：细和轻哪个更重要？

在第 6 章 6.4 节中，Luigi Tavolino 的桌子获得了巨大的成功。他决定开发一系列低成本的管状桌腿的家具。有些桌腿要尽量细，有些则要尽量轻。因此，他需要一种更为全面的方法来探究材料及其形状。

1. 解读和选择

通常，管可以制成任意半径 r 和壁厚 t。但是，正如我们在第 9 章所说，将 r/t 设置的太大是不切实际的，因为极易导致局部屈曲。Luigi 选择 CFRP 作为桌脚的材料，该类材料可用的最大形状因数是 10，对应 $r/t=10.5$（参考表 9.3）。薄壁管的横截面面积 A 和惯性矩 I 分别为：

$$A=2\pi rt$$

$$I=\pi r^3 t$$

由以上两式可得：

$$r=\left(\frac{2I}{A}\right)^{1/2} \tag{10.5}$$

将上式所得 r 值的等高线绘制在图 10.5 所示四象限图集中的 A-I 象限中，表征为一系列斜率 1 的直线。这些等高线可用于质量最小化或管材半径最小化的设计。

Luigi 也可能采用另一种方法。首先，设计一张桌子，其桌腿为圆柱形，长度 $L=1\text{m}$。为安全起见，每个桌腿必须能够支撑 50kg 而不发生失稳，即：

$$\frac{\pi^2}{4}\frac{EI}{L^3}\geqslant 500\text{N}$$

由此可得：

$$EI\geqslant 200\text{N}\cdot\text{m}^2$$

如图 10.5 所示，Luigi 在四象限图集中绘制了一条矩形选择路径。最轻质的桌腿，对应材料可允许的最大 ϕ_B^e 值。就 GFRP 而言，该值为 10。但是，这样桌腿就会变得很粗，读取图中的等高线可知半径接近 20mm。最细的桌脚必然是实心的，也就是说 $\phi_B^e=1$。这样的桌腿要细得多，半径只有 5mm，但重量几乎是原来的 3 倍。

2. 附言

此时，Luigi 不得不做出权衡：粗而轻还是细而重，抑或两者之间。当然，他也可以选择其他材料。四象限图集法的一个优势就是，它可以很方便地用于其他材料的探索。针对铝材，取其 ϕ_B^e 上限为 15 重复上述过程，或者将 CFRP 的上限设成与 GFRP 一

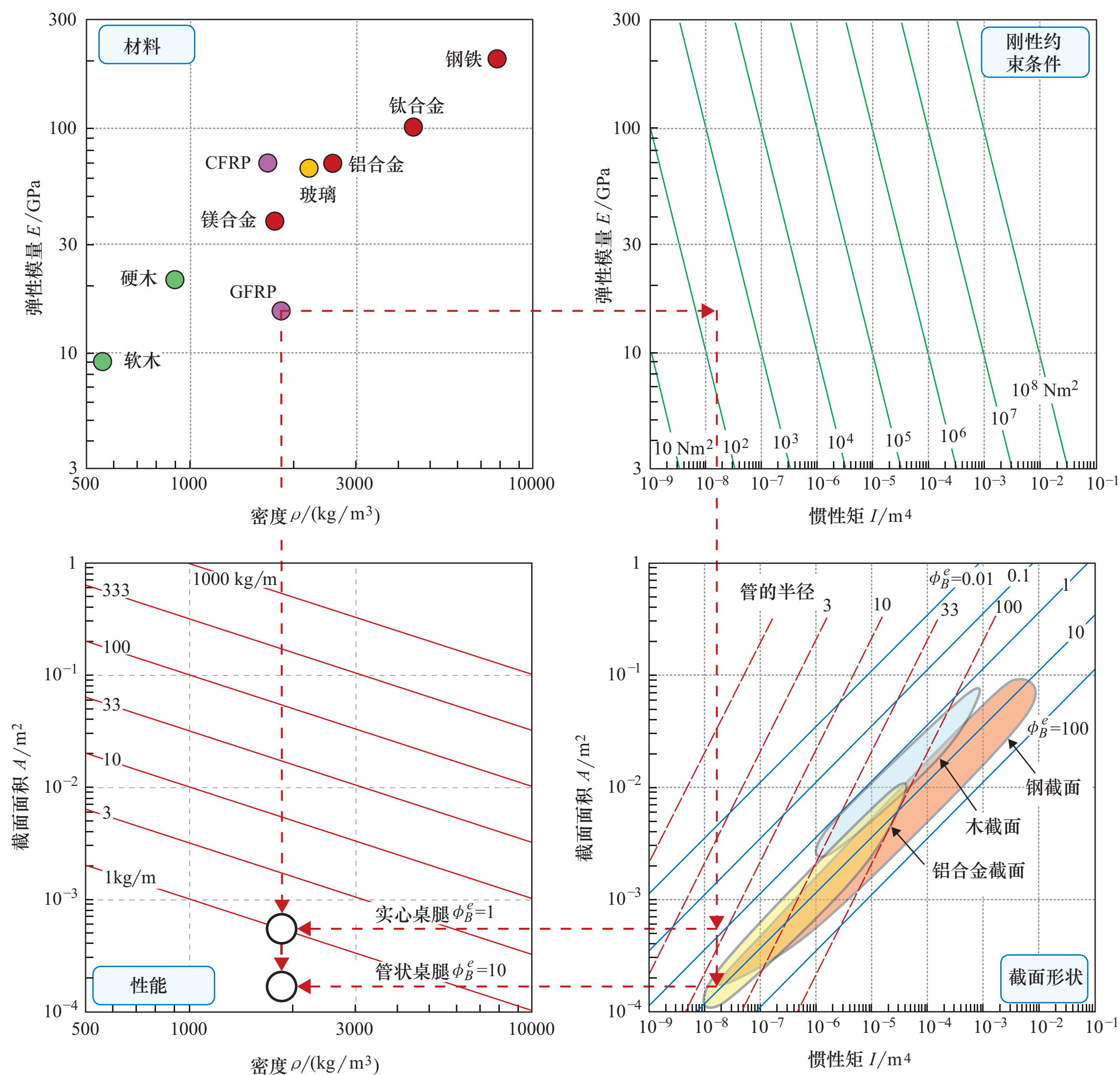


图 10.5 用于管材有限刚度设计的图集（*I-A* 象限中有对应半径 *r* 的等高线。最细的 GFRP 桌腿，对应 $\phi_B^e=1$。最轻的 GFRP 桌腿，对应 $\phi_B^e=10$，即 GFRP 的最大形状因数值。）

样，再次进行设计都是易如反掌的工作。

相关案例：

见“桌腿材料”（见 6.4 节）、“冲突目标：桌腿”（见 8.5 节）。

10.6 钢板刚度的增加

怎样增加钢板的刚度呢？有很多你想要这样做的理由。最明显的是可以使刚度约束的板材结构更轻；可以使板材承受更大的平面压缩载荷而不发生屈曲；可以提高板材结

构的自振频率。弯曲刚度与 EI 成比例（其中，E 为弹性模量；I 为板材的截面惯性矩，单位宽度时等于 $t^3/12$，其中 t 为板料厚度）。钢的弹性模量很难改变，通常为 210GPa。因此，增大刚度的方法就是改善形状，提高 I 值。表 10.8 对设计要求做了归纳。

表 10.8 加硬钢板的设计要求

功能	用于有限刚度结构的钢板
约束条件	外形偏离水平面的极限范围是±5 倍的厚度
	制造成本低廉
目标	钢板的弯曲刚度最大化
自由变量	截面形状

1. 解读和选择

过去增加钢板刚度的方法是波纹成形，使其呈正弦波形。波纹使得波纹法线方向轴的截面惯性矩有所增加，从而增加了一个方向的弯曲抗力，但在横截面方向则没有任何改变。

波纹成形是一个不错的创意，但从实用角度来说板料的刚度必须在各个方向，而不是仅仅在一个方向得到强化。图 10.6 所示的微凹六边形网格可实现这一需求。此时，所有方向的弯曲刚度都得以增强。微凹不一定非是正六边形。对于任意图案，只要任意绘制的直线上均有相交的微凹，这样的图案都是可行的。不过，可能六边形是最好的选择。

图 10.6 下半部分为 A—A 方向的理想截面放大图。与之前一样，我们将形状因数定义为微凹板材刚度与平板刚度的比值。对于单位宽度的平板，其截面惯性矩为：

$$I_o = \frac{t^3}{12} \tag{10.6}$$

幅值为 a 的微凹板材的截面惯性矩为：

$$I \approx \frac{1}{12}(2a+t)^2 t \tag{10.7}$$

根据形状因数的定义，可得：

$$\phi_B^e = \frac{I}{I_o} \approx \frac{(2a+t)^2}{t^2} \tag{10.8}$$

注意：当幅值为 0 时，形状因数的值为 1，它随着幅值的增大而增大。弯曲失效的等效形状因数为：

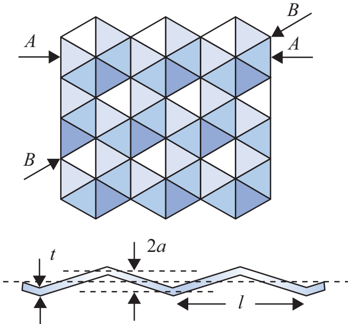


图 10.6 在板材上增加相邻的六边形微凹，可以增大刚度和强度（文中给出了截面 A—A 的形状因数，虽然不是很高，但远大于 1。）

$$\phi_B^f = \frac{Z}{Z_o} \approx \frac{(2a+t)}{t} \tag{10.9}$$

由这些公式的预测值可知，刚度和强度均能获得大幅提高。但实际情况并非如此。原因在于，尽管板材所有方向的横截面都有微凹，但只有微凹顶端的幅值才为峰值，其他位置都低于该值。即便如此，峰值也不一定是连续的，B—B 截面的微凹就是不连续的。尽管存在上述问题且受局部屈曲的限制，波纹板材的刚度和强度确实得到了增加。

2. 附言

微凹结构可应用于大多数轧制板。在最后一个道次增加一个带微凹网格的配套轧辊，使板材获得微凹网格体所需要的成本并不高。这项技术通常用于钢板。制成的钢板可以应用于汽车的保险杠支架、座椅框架、侧面防撞杆，减重的同时不损失力学性能。在提高板刚度的同时，还可以提高自振频率，使其难以共振，提高了板材的抗振能力。

但是，这种做法也存在风险。板料刚度的提升会改变其失效机制。弯曲载荷下，平板的失效形式为屈服；微凹薄板的失效形式可能为局部失稳。这正是微凹结构未得到广泛应用的重要原因。

相关阅读：

Fletcher，M.(1998). Cold-rolled dimples gauge strength. *Eureka* (May).

A brief account of the shaping of steel panels to improve bending stiffness and strength.

相关案例：

见“弯曲形状：片式和股式”(见 10.7 节)。

10.7 弯曲形状：片式和股式

挠性电缆、板弹簧和螺旋弹簧，以及弹性铰链所需要的结构效率较低。确切地说，是在某一方向或两个方向上要求较低的弹性或扭转刚度，而在其他方向上保持较高的刚度和强度。最简单的例子就是图 10.7a 所示的扭力杆，其形状因数 $\phi_T^e = 1$。图 10.7b 所示的单片式弹簧允许更低的 ϕ_B^e 值（$\phi_B^e = h/w$；尺寸定义见图。)

多股缆绳和多片叠加结构的性能要好得多。首先我们来看一下效率的改变。按图 10.7c 和图 10.7d 所示，将实心正方形横截面 $A = b^2$ 的梁细分为 n 股圆柱形线材，每根半径为 r，则：

$$n\pi r^2 = b^2 \tag{10.10}$$

棒材的轴向刚度正比于 EA，其弯曲刚度 S_o 正比于 EI_o。其中，E 为材料的弹性模量；I_o 为截面惯性矩。若采用多股平行线材结构，轴向刚度保持不变，但弯曲刚度 S 却大大减小，与 nEI 成正比。其中，I 为单股线材的截面惯性矩。因此，有：

$$S \propto nE\frac{\pi r^4}{4} = \frac{1}{4\pi}E\frac{b^4}{n} \tag{10.11}$$

由此可知，缆绳的结构效率为：

$$\phi_B^e = \frac{S}{S_o} = \frac{nEI}{EI_o} = \frac{3}{n\pi} \tag{10.12}$$

股数 n 可以做到很大，这样能够更大限度地改变弯曲刚度，同时保持轴向刚度不变。

多片式结构可以产生更大的各向异性。将图 10.7b 中的厚板分成一叠图 10.7e 所示的具有相同宽度的薄板，其弯曲刚度将从 S_o 变为 S。

$$S_o = Ewh^3/12$$
$$S = nEwt^3/12$$

式中，$t=h/n$。层叠板的形状因数为：

$$\phi_B^e = \frac{S}{S_o} = \frac{nt^3}{h^3} = \frac{1}{n^2} \qquad (10.13)$$

这样，10 层层叠板的弯曲刚度将是等厚度单片结构的 1/100，而平面刚度保持不变。

附言

当分层结构受弯曲载荷时，各部分之间会发生滑移。前面所做的分析都假定之间的滑移无摩擦阻碍。静摩擦力会阻碍相对滑动，在发生相对滑动之前，分层结构的弯曲刚度与未分层结构的弯曲刚度是一致的。通常，可以在片式弹簧之间加入润滑剂或插入 Teflon 垫片来促进相对滑动。

相关案例：

见 “钢板刚度的增加”(见 10.6 节)、“超高效弹簧”(见 10.8 节)。

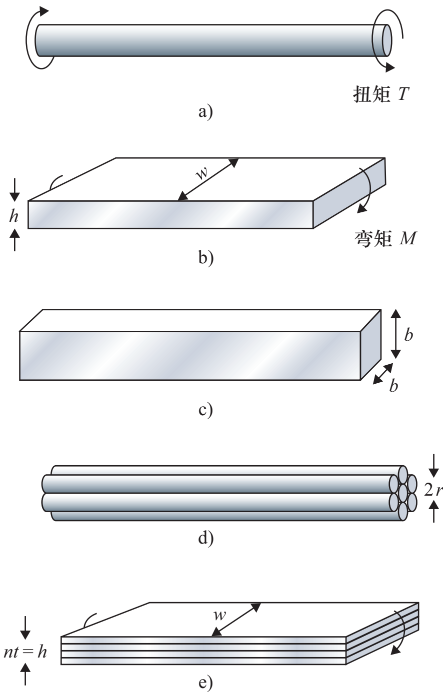


图 10.7　具有不同的强度和刚度结构在不同方向上

a) 简易扭力杆　b) 用于单片式结构形状因数定义的宽为 w 的平板　c) 用于缆绳形状因数定义的标准形状　d) 与图 c 等截面积的 n 股结构缆绳　e) 与图 b 等宽度等截面积的多片叠加结构

10.8　超高效弹簧

本书第 6 章 6.7 节已介绍，弹簧是用来储存能量的。它们所用材料对应的 σ_f^2/E值应越大越好，或者假定质量比体积更重要的话，材料对应的 $\sigma_f^2/\rho E$ 值应越大越好。此外，我们还可通过改变弹簧的横截面形状来提高其效率。

我们以单位体积的弹簧材料所能存储的能量作为衡量弹簧性能的重要指标，这个数值越大越好。单位质量的能量最大化以及单位成本的能量最大化可以通过类似的求解过程来实现（见表 10.9）。

表 10.9　超高效弹簧的设计要求

功能	超高效弹簧
约束条件	在设计载荷下必须保持弹性
目标	单位体积(质量或成本)的储能最大化
自由变量	材料选择
	横截面形状

1. 解读和选择

首先以图 10.8a 所示的单片式弹簧为例。单片式弹簧就是一个弹性弯曲梁。承载 F

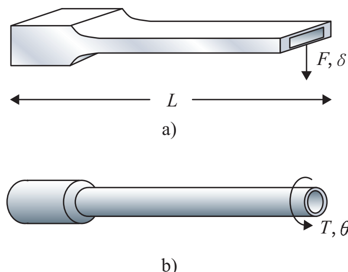


图 10.8 空心弹簧比实心弹簧的材料效率更高（空心矩形或椭圆形截面最适用于弯曲，管形最适用于扭转。）

的情况下，储存在弯曲梁中的能量为：

$$U=\frac{1}{2}\frac{F^2}{S_B} \tag{10.14}$$

式中，S_B是弹簧的弯曲刚度，可由式（10.15）计算所得。

$$S_B=\frac{C_1}{12L^3}E\phi_B^e A^2 \tag{10.15}$$

式（10.14）中的载荷 F 受屈服强度的限制，其最大值为：

$$F_f=C_2 Z\frac{\sigma_f}{L}=\frac{C_2}{6L}\sigma_f\phi_B^f A^{3/2} \tag{10.16}$$

上述表达式中的常数 C_1 和 C_2 参见附录 B 中的表 B.3 和表 B.4。将式(10.15) 和式(10.16) 整理后代入式(10.14)，可得到弹簧所能储存的最大能量为：

$$\frac{U_{\max}}{V}=\frac{C_2^2}{6C_1}\left(\frac{(\phi_B^f\sigma_f)^2}{\phi_B^e E}\right) \tag{10.17}$$

式中，$V=AL$，是弹簧实心部分的体积。因此，最好的材料与形状组合，对应的材料指标 M_1 值最大。

$$M_1=\frac{(\phi_B^f\sigma_f)^2}{\phi_B^e E} \tag{10.18}$$

如果横截面形状固定，式(10.18)中两个 ϕ 值的比值是常数，则最好的材料是对应 σ_f^2/E 值最大的材料，与之前的结果相同。若形状为变量，最高效的形状对应的 $(\phi_B^f)^2/\phi_B^e$ 值最大。表 10.10 给出了普通横截面形状的上述比值。中空方形与中空椭圆形截面的形状效率是相应实心截面的三倍多。

扭力杆和螺旋弹簧通常用于承受扭转载荷。借助相似的计算方法，可得：

$$\frac{U_{\max}}{V}=\frac{1}{6.5}\frac{(\phi_T^f\sigma_f)^2}{\phi_T^e G} \tag{10.19}$$

对于螺旋弹簧，最佳的材料与形状组合对应材料指标 M_2 值应最大。

$$M_2=\frac{(\phi_T^f\sigma_f)^2}{\phi_T^e E} \tag{10.20}$$

上式中，G 用 $3E/8$ 做了替换。选择标准是一样的。当形状固定时，最好的扭力杆材料对应的 σ_f^2/E 值最大。由表 10.10 可知，中空管是最高效的截面形状，$(\phi_T^f)^2/\phi_T^e$ 值是实心圆柱形截面的两倍，比其他任何形状的效率都要高。为获得单位质量储能最大的弹簧，可用 $E\rho$ 替换式(10.18)和式(10.20)中的 E 后进行选择。若想获得单位成本储能最大的弹簧，则用 $EC_m\rho$ 替换 E，其中 C_m 是单位质量的材料成本。

表 10.10 代表弹簧效率的形状因数

横截面形状	$(\phi_B^f)^2/\phi_B^e$	$(\phi_T^f)^2/\phi_T^e$
h, b	1	$1.08\frac{b^2}{h^2}\frac{1}{\left(1+0.6\frac{b}{h}\right)^2\left(1-0.58\frac{b}{h}\right)}$
a, a	0.38	0.83
$2r$	0.75	1.6
$2a$, $2b$	0.75	$0.8\left(1+\frac{a^2}{b^2}\right)(a<b)$
t, $2r_i$, $2r_o$	1.5	3.2
t, h, b	$\frac{(1+3b/h)}{(1+b/h)}(h,b\gg t)$	$3.32\frac{1}{(1-t/h)^4}\cdots\cdots(h,b\gg t)$
t, $2a$, $2b$	$\frac{3(1+3b/a)}{4(1+b/a)}(a,b\gg t)$	$3.2\frac{(1+a^2/b^2)}{(1+a/b)}\left(\frac{b}{a}\right)^{3/2}(a,b\gg t)$
t, h_i, h_o, b	3	—
t, $2t$, h, b	$\frac{(1+3b/h)}{(1+b/h)}(h,b\gg t)$	$1.07\frac{(1+4h/b)}{(1+h/b)}(h,b\gg t)$
$2t$, h, $2t$	$1.13\frac{(1+4bt^2/h^3)}{(1+b/h)}(h\gg t)$	$0.54\frac{(1+8b/h)}{(1+b/h)}(h,b\gg t)$
$2t$, h, t, b	$1.13\frac{(1+4bt^2/h^3)}{(1+b/h)}(h\gg t)$	$1.07\frac{(1+4h/b)}{(1+h/b)}(h,b\gg t)$

2. 附言

中空弹簧常用于振动与摆动设备，以及惯性力必须最小化的仪器。中空椭圆形截面主要用于承受弯曲载荷的弹簧，中空管状截面主要用于承受扭转载荷的弹簧。关于更多此类问题的讨论，可参见博弈特 1963 年的经典著作。

相关阅读：

Boiten，R. G.（1963）：Mechanics of instrumentation. *Proc. I. Mech. E.*，177，269. *A definitive analysis of the mechanical design of precision instruments.*

相关案例：

见"弹簧材料"（见 6.7 节）、"弯曲形状：片式和股式"（见 10.7 节）。

10.9 本章小结

在进行承载零部件设计时，尤其是承受弯曲、扭转或屈曲载荷的零部件，设计者可以通过两组变量来优化性能，即材料与形状。材料的选择依赖于其可获得的或可加工的形状。对此，本书第 9 章阐述了优化选择材料与形状组合的方法。

基于实例本章对上述求解过程作了详细阐述。通常情况下，设计者会有一些候选材料，这些材料都呈一定的形状。针对这类情况，只要相应的材料指标值达到最大（很多指标已列于表 10.1），就能实现性能的最大化。有时，截面形状可定制，根据材料性能和设计载荷确定出一个可行的最大形状因数，确保不会发生局部失稳。同样，上述过程能给出材料与形状的最佳组合。

效率的进一步提升还可以通过宏观形状与微观形状的结合来实现，本书后续章节我们将对此做详细讨论。

第 11 章

杂化材料设计

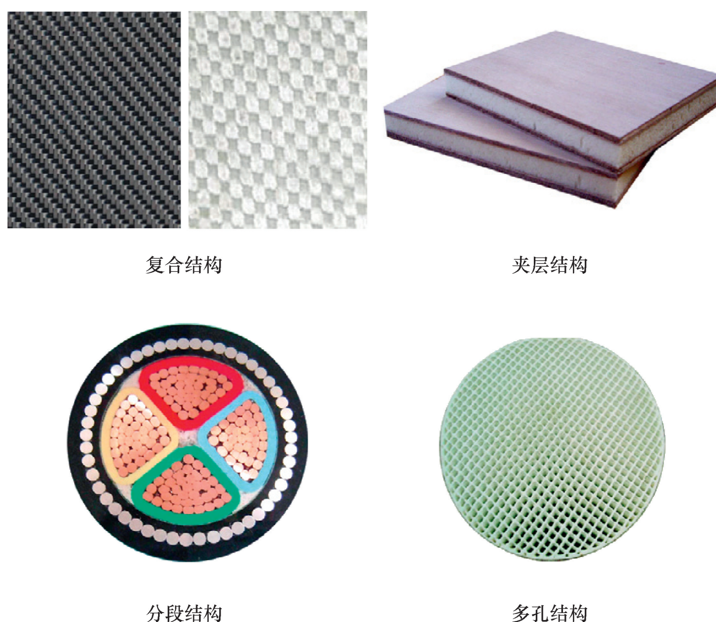


图 11.0　杂化材料

11.1　引言

为什么养马人会让马和驴交配产生骡子？为什么较天然谷物而言，农民们更倾向于杂交谷物？骡子以固执著称，且与杂交出来的谷物一样，它们不能生育下一代，因此马和驴必须重新交配来产生新一代的骡子。既然如此，为什么还要杂交出它们呢？尽管相对于它们的祖宗来说，它们还有很多缺点和不足，但是它们也有诸如顽强、强壮以及高抗病性等优点。对于这些，我们可以用“杂交优势”这一植物术语来总结。

因此，让我们来探索下杂化材料的设想，即将两种或两种以上的材料以某种方式组合在一起使之获得任意其中一种材料都不具备的性能（见图 11.1 的中心圆圈）。如同骡子一样，我们发现有些属性会不再优秀（比如：成本），但只要我们所需要的属性得以提升，那我们的目标也就达到了。颗粒与纤维增强复合材料是杂化材料中的一种类型，除此以外还有很多其他类型，如夹层结构、晶格结构和分段结构等。本章我们

主要探索杂化材料的设计方法，着重研究各组成部分的选择、结构布局、相对体积分数以及尺寸大小（详见表 11.1）。新变量的引入扩展了设计空间，促进了特殊性能新材料的诞生。

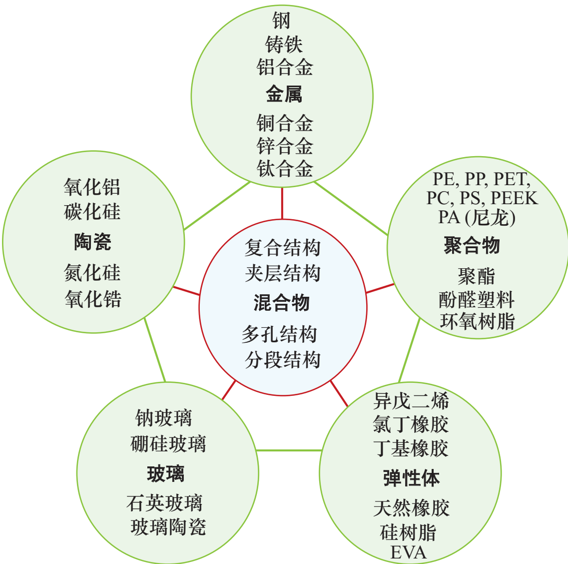


图 11.1 杂化材料具备两种或两种以上单一材料的性能组合，抑或是一种材料与空隙的性能组合（杂化材料包括纤维与颗粒增强复合材料、泡沫与晶格、夹层结构以及所有的天然材料。）

表 11.1 杂化设计要素

组分	杂交材料的选择
构型	组分的形状和连通性
相对体积	各组分的体积分数
尺寸	结构单元的长度尺寸

但是，这样又会突显另一个问题，即：如何比较杂化材料（如夹层结构材料）与单一材料（如聚碳酸酯或钛合金）的性能？为解决上述问题，不能仅仅将夹层结构材料视为一种材料与另一种材料的结合，而应将其视为一种具有独立属性的材料。基于此，我们才能展开比较。

本章所采用的方法，相对于精度而言更注重广度。其目的在于，通过多种方法的组合来实现可供选择的杂化材料的属性搜索与比较，找寻最符合给定设计要求的杂化材料。一旦选定材料与构型，优化程序及有限元分析等标准化方法可用于进一步精炼结果。但是，标准化方法在快速搜索材料组合方面表现一般。为解决该问题，后续章节中我们将引入一种近似方法，在该方法中材料与构型将被视为变量。

这里我们有必要来阐述下构型这个概念。图 11.2 展示了四种不同的桥梁构型。在第一种构型中，所有的部件都承受压应力；在第二种构型中，取决于受载情况不同，桥梁部件既会承受拉应力也会承受压应力；在第三种和第四种构型中，悬索仅承受拉应力。上述任意一种构型都能加以优化，但无法使得一种构型进化为另一种构型，因

为每一种构型都由各自的一组变量定义而成，构型间无法发生离散跳跃。

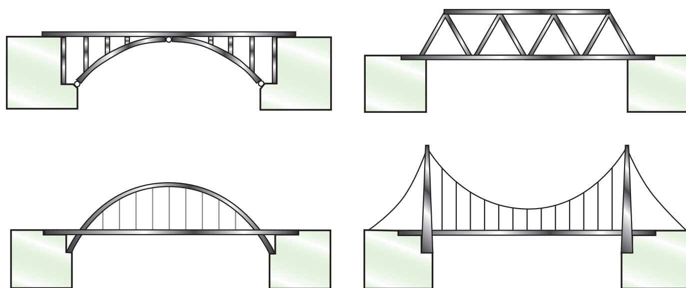


图 11.2 四种桥梁构型（用以描述各自性能的设计变量不尽相同。只有选中某种构型后才会考虑进行性能优化。）

杂化设计具有同样的特点，即根据构型来区分合成物的类型。本章重点讨论四种类型，每一种都有一系列离散单元。图 11.0 给出了这四种类型的样式。为简化描述，后文将使用下述简称：复合结构、夹层结构、多孔结构和分段结构。复合物通常是将纤维或颗粒状强化物包含在另一种基体材料中，其性能为各组成分的平均性能。在尺寸远大于强化物尺寸的情况下，复合物可视为均质材料。夹层结构由芯部材料及其两侧的材料组成，通常情况下芯部材料的密度较低。这种构型的比弯曲刚度优于其组成分各自所能提供的弯曲刚度。多孔结构由材料与空隙组成，当然空隙内也可以填充其他材料。我们可以将多孔结构分为两大类。当晶格承载时，第一类多孔结构由于其支杆的弱连接性，支杆会发生弯曲；第二类多孔结构则由于支杆的强连接性抑制了弯曲变形，支杆会被伸长。分段结构可以将材料在多个维度上进行细分。这种细分不仅可降低刚度，同时损伤容限得以大大增加。

本章我们将利用界限法来估算每一种构型的属性。基于这些属性，我们可以计算出给定的一组材料在特定构型下的性能，并将其绘制在材料选择图中。这些图可用作选择材料与构型的工具。

11.2 材料性能空间中的空缺

第 4 章中所有的图都有一个共同点：部分区域内材料众多，而部分区域内依然是空白（见图 11.3）。部分区域内材料缺失的根本原因与原子尺寸及其结合力有关，还有部分区域原则上是可以存有材料的。

通过材料的开发或组合，是否能在这些空白区域填上些什么呢？材料指标给出了很多有益的区域。图 11.3 给出了材料指标 E/ρ 的等高线。由图可知，如果被填充区域能向箭头方向加以扩展，我们就可以得到质量更轻、刚度更好的结构。箭头方向垂直于材料指标线，我们将其定义为材料开发矢量。

一直以来，填补空白是以开发新的金属合金、新的高分子化合物、新的复合材料以及陶瓷材料为主，以此扩展性能图中的填充区域。图 1.2 论述了材料的发展历程。但是，开发新材料成本高昂，且充满不确定性，获益呈渐进式而非阶梯式。另一种可行的方法是将两种或更多的现有材料加以组合，实现材料性能的叠加。一言以蔽

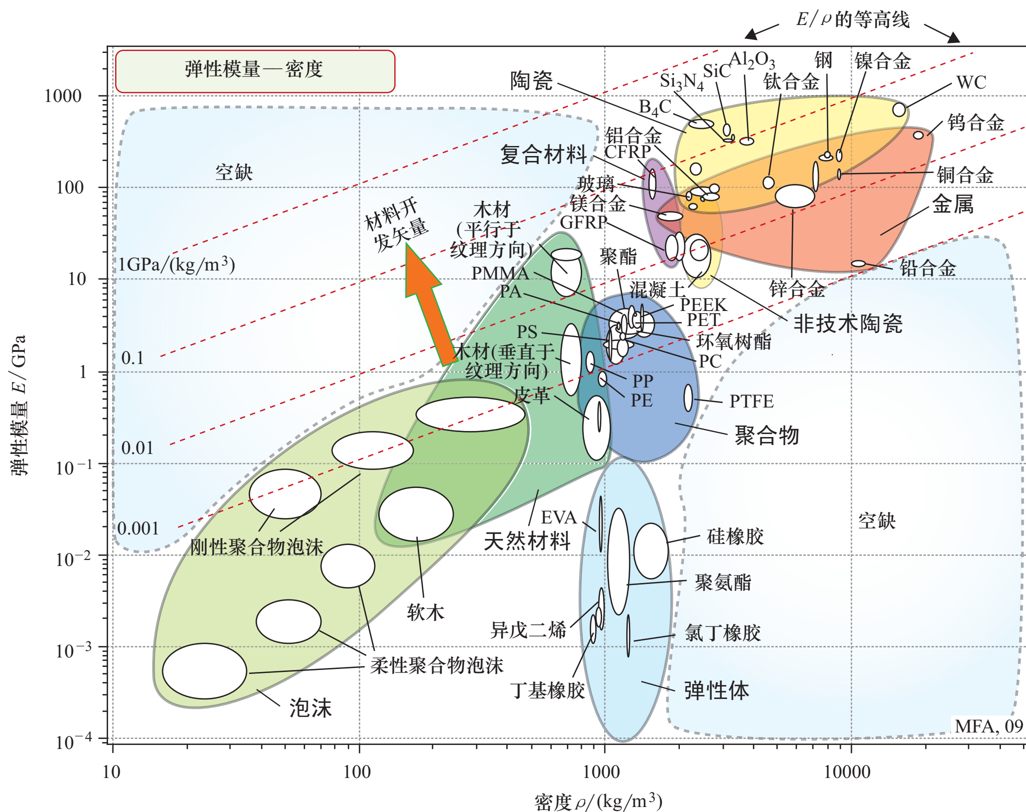


图 11.3 弹性模量-密度图中的空白区域，图中绘有 E/ρ 的等高线
（随着材料的发展，填充区域会沿着箭头方向扩展，从而获得比刚度更大的零件。）

之——创造杂化材料。碳纤维增强复合材料以及泡沫材料的出现，使得材料性能图中的空白区域得以有效补充，让我们在探索杂化材料的道路上大受鼓舞。

那么，我们预期的目标是什么呢？图 11.4 以属性 P_1 和 P_2 为坐标轴，给出了两种材料 M_1 和 M_2 的四种杂化方案。根据材料的构型及其结合方式的不同，我们可得到以下结果。

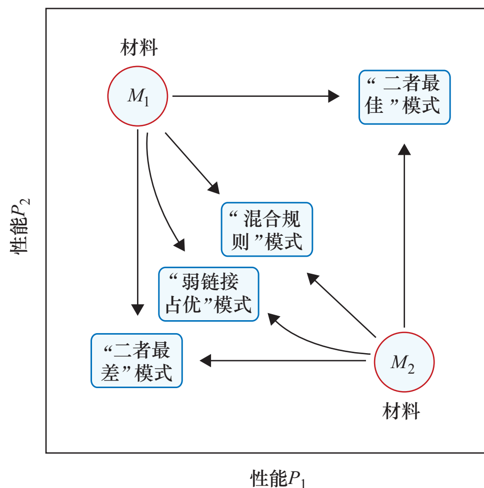


图 11.4 各种杂化可能（混合物的性能由各组成分的性能组合决定。）

◇ "二者最佳" 模式。最理想的情况当然是创造出的杂化材料兼有二者的最佳性能。通常情况下，将一种材料的体积性能与另一种材料的表面性能相结合，就能兼顾二者的最佳性能。比如镀锌钢板，既有钢的强度和韧性，也兼具锌的耐蚀性；釉陶既充分利用了黏土的低成本和高塑性，又结合了玻璃的抗渗性和耐蚀性。

◇"混合规则"模式。对于结构复合材料这类杂化材料，体积性能的组合所能获得的最佳性能一般是各组成分性能的算术平均值，权重由其体积分数决定。因此，单向纤维增强复合材料的轴向模量（平行于纤维方向）由"混合规则"决定。

◇"弱链接占优"模式。有时候我们会经历一些弱妥协，如颗粒增强复合材料的刚度。在这种情况下，杂化材料的性能下降很多，更接近于二者性能的调和平均值而非算术平均值。尽管获益没有那么显著，但依然具有应用价值。

◇"二者最差"或最弱链接模式。有时候我们寻求的不是最佳性能的组合，而是最差性能的组合。如消防系统，使用蜡和金属混合设计。当温度超过低熔点材料的熔点时，它就会失效并喷水。

上述情况只涉及某些特定情况，并非所有的情况，其他组合形式也是可行的。后文我们将加以说明。

什么样的混合物才能称为一种"材料"呢？对于混合物的认定与讨论，存有一定的二元性。某些混合物，如填充聚合物、复合材料或木头都被定义为一种材料，各自具有与之相应的材料属性。另外一些混合物，如镀锌钢板则常被视为一种材料镀上另一种材料。尽管它可以视为一种新材料，既有钢的强度，也有锌的表面性能。夹心板很好地诠释了这种二元性，有时被视为两块板材由芯部材料分隔而成，有时为了便于与其他材料进行比较，也被视作一种"材料"，具有相应的密度、弯曲刚度和强度。总的来讲，将混合物视作一种新材料并塑造其相应的属性，对于其后续应用会大有帮助，设计师可以采用已有的方法来处理这些新材料。但是，如果我们要设计混合物本身，我们必须解构它，将它视为在特定构型下多种材料（或材料与空隙）的组合。

11.3 设计方法：A+B+构型+尺寸

在开始讲设计方法前，我们先给出一个定义。杂化材料是由两种或两种以上的材料以预定的构型、相对体积分数和尺寸组合而成，从而以最优的情况用于特定的工程目的，这种组合可以简称为"A+B+构型+尺寸"。此处，A 和 B 为广义的材料，包括气体或仅仅是空隙。这些新的设计变量大大扩展了设计空间，如果将选择仅仅限定在单一材料内，则无法得到最优化的性能。

图 11.5 阐述了杂化材料的基本设计理念。很多工程设计都以单一材料的特定性能组合为设计依据。在设计过程中，设计要求会隔离出一个材料性能空间区域。如果该区域内包含材料，那么直接从中选择一种材料就能满足设计要求。但是，如果设计要求十分苛刻，在性能空间中无法找到能满足要求的单一材料，即设计要求的性能正好位于材料性能图表中的空白区域。此时，就需要识别并分离出相互冲突的设计要求，找到各自最佳的材料方案，然后将其结合起来，以获得令人满意的性能组合。最佳选择显然是具有最优性能指标的材料，这些指标激励着设计不断革新，如质量最小化、成本最小化或某一性能最大化（卓越标准）。通过对不同的组合方式加以测试和评估，并基于卓越标准进行排序，就可得到依据各组成分及其构型所形成的混合物说明书。

针对复合结构、夹层结构、多孔结构和分段结构这四类混合物结构的具体应用将在后续四节中分别阐述。

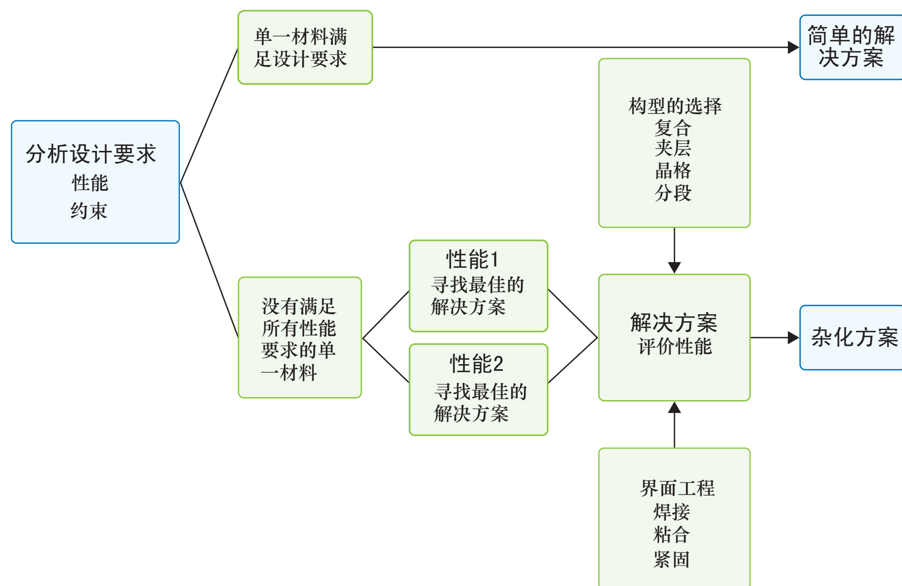


图 11.5 杂化材料的设计步骤

11.4 复合材料

飞机工程师、汽车制造商以及运动器材设计师都有一个共同特点。他们都要求材料有足够的刚度、强度和韧性，且轻质。最满足上述要求的单一材料是轻合金，如镁合金、铝合金和钛合金。很多研究都旨在改善它们的性能。然而，它们既不是最轻的，刚度也不是最大的。聚合物的密度更低，陶瓷的刚度更大，当陶瓷呈细小颗粒状或纤维状时强度更高。这些特性早已被应用于结构复合物中，通常我们将其称之为颗粒与纤维增强复合材料。

从理论上来说，任意两种材料都能组合成复合材料，并呈现不同的几何形状（见图 11.6）。在本节中，我们的讨论将仅限于完全致密且牢固粘接的复合材料。这类复合材料在受载时，各组成分不会在交界面发生脱粘。此外，本节的讨论仅限于强化物尺寸远远大于原子或分子尺寸以及位错间距的情况，这样我们就能应用连续介质的方法。

宏观尺度上，复合材料可视为均质固体，有其特有的力学、热学以及电学性能。精确计算这些性能将会是十分困难的，而利用界限与极限来确定其性能的上下限则要容易很多。界限这个术语一般用于描述严格的边界。在特定假设条件下，任何性能值都不能超越或低于界限值。我们并不总是能推导出界限值，通常情况下只能推导出一些极限值。性能值几乎不可能位于这些极限值之外。重要的是，界限或极限可以对图 11.6 所示各种基体与强化物构型的属性加以界定。基于这些信息，我们不再需要对单一几何体进行建模。

1. 卓越标准

对于特定混合物的评价需借助卓越标准来完成，如第 5 章所述的材料指标。如果混合物能在所对应的任一材料指标方面超越现有的材料，那么我们的目标就实现了。

2. 密度

将体积分数为 f 的强化物 r（密度为 ρ_r）与体积分数为 $(1-f)$ 的基质 m（密度为 ρ_m）相组合，形成没有孔隙的复合材料。该复合材料的密度可由下列混合规则计算得到：

$$\widetilde{\rho}=f\rho_r+(1-f)\rho_m \quad (11.1)$$

强化物的几何或形状只用于确定强化物的最大体积分数，即 f 的上限值。

3. 弹性模量

复合材料的弹性模量可由著名的 Voigt-Reuss 界限得出。上界限值$\widetilde{E}_u$ 的获取，是假定受载时两种组成分的应变相同。此时，应力是局部应力的体积平均值，复合材料的弹性模量满足下述混合规则：

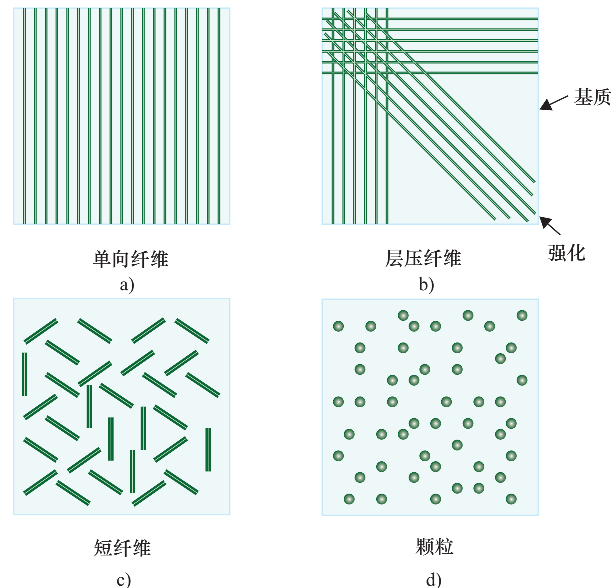


图 11.6 复合类型

a）单向纤维 b）层压纤维 c）短纤维 d）颗粒状复合物

（可以利用界限与极限来界定这些复合物的性能。）

$$\widetilde{E}_u=fE_r+(1-f)E_m \quad (11.2a)$$

式中，E_r、E_m 分别是强化物与基质的弹性模量。下界限值$\widetilde{E}_L$的获取，是假定两种组成分承受的应力相同。此时，应变是局部应变的体积平均值，复合材料的弹性模量满足下列关系：

$$\widetilde{E}_L=\frac{E_mE_r}{fE_m+(1-f)E_r} \quad (11.2b)$$

我们可以通过其他方法获得更为精确的界限值，但上述结果已足以阐述相关方法。下面我们通过例子进一步了解界限值的使用。

保证刚度的情况下质量最小化的复合材料设计

目前，梁一般由铝合金制成。相比于铝，铍更轻，密度更小，氧化铝陶瓷（Al_2O_3）的强度高，但密度较大。那么，将铝与其中任一材料制成的混合物，依据第 5 章推导的卓越标准 $E^{1/2}/\rho$，其性能能否得以改善呢？

图 11.7 给出了 E-ρ 性能空间图表的局部，图中包含了三种材料。所形成的复合材料的密度和模量界限可分别由式(11.1)和式(11.2a)、式(11.2b)计算得到。它们的弹性模量都取决于强化物的体积分数，进而与密度相关联。由此，可借助体积分数 f 将弹性模量 E 与密度 ρ 的关系的上、下界限绘制在它们的关系图中，如图 11.7 所示。任何由铝及氧化铝组成的复合材料的弹性模量均位于 Al-Al_2O_3 的包络区域内。相应地，由铝和铍组成的复合材料的弹性模量也在 Al-Be 的包络区域内。纤维强化物在平行于纤维方向上的模量接近于上限值；颗粒强化物或横向受载纤维的弹性模量接近于下限值。

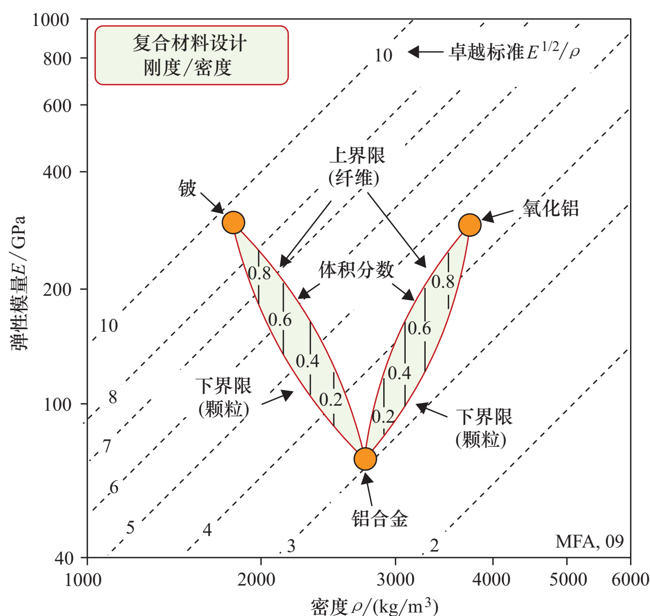


图 11.7 部分弹性模量 E 与密度 ρ 的性能图，标识了铝合金、铍以及氧化铝
（图中标注了混合物的弹性模量界限，以及对应卓越标准 $E^{1/2}/\rho$ 的等高线。）

图 11.7 中的等高线对应卓越标准 $E^{1/2}/\rho$。Al-Be 复合材料的界限包络沿垂直于等高线的方向扩展，而 Al-Al_2O_3 复合材料的界限包络则与等高线呈一个小角度。在相同体积分数下，铍纤维对材料性能的改善几乎是铝纤维的 4 倍。当采用颗粒状纤维时，这种差异更明显。Al-Be 复合材料的下界限与等高线相垂直。加入体积分数为 30%的颗粒状铍纤维，可将 $E^{1/2}/\rho$ 值提高 1.5 倍。Al-Al_2O_3 复合材料的下界限平行于 $E^{1/2}/\rho$ 等高线。加入体积分数为 30%的颗粒状氧化铝几乎没有任何获益。潜在的原因在于铍和氧化铝虽然都能提高弹性模量，但只有铍能降低密度。相对于弹性模量而言，卓越标准对密度更为敏感。

工业合金 AlBeMet（体积分数：Be 62%和 Al 38%）充分利用了上述理念。Al 和 Be 这两种元素之间不可溶，由此可产生 Al 和 Be 两相复合材料，对应 $E^{1/2}/\rho=6.5$，而只用 Al 的话，$E^{1/2}/\rho=3.1$。

4. 强度

就本章所描述的所有界限与极限，其中关于强度的部分是最不让人满意的。究其原因，主要是问题的非线性、失效机制的多样性，以及强度和韧度对杂质与加工缺陷的敏感度使得精确建模变得十分困难。本文涉及很多特例计算，如基于单向纤维或球形弥散强化。我们希望模型尽可能不涉及颗粒结构行为这类细节，且限制条件不那么严格。

随着施加在长纤维增强复合材料上载荷的逐步增加，各组成分承受的载荷会重新进行分配，直至其中一种材料达到整体屈服或出现断裂（见图 11.8a）。一旦超过这个临界点，复合材料就会承受永久变形或者损伤，但仍然可以承受载荷。当两种材料都发生屈服或者出现断裂时，复合材料才会最终失效。如果各组成分能同时进入失效状态，则这种复合材料的强度很高。因此，对于图 11.6 所示的单向纤维增强复合材料，

当所受载荷平行于纤维方向时，其轴向拉伸强度（下标为 a）的上界限值满足混合规则。

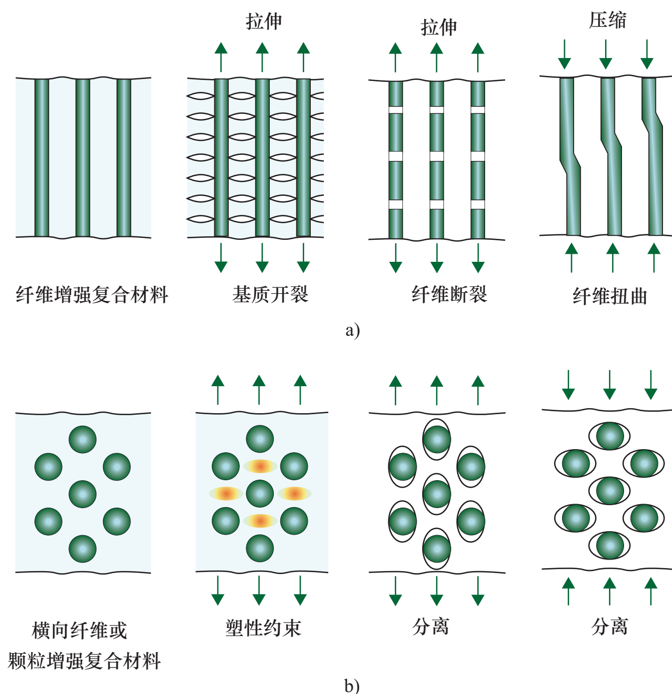


图 11.8 复合材料的失效形式

$$(\widetilde{\sigma}_f)_{u,a}=f(\sigma_f)_r+(1-f)(\sigma_f)_m \tag{11.3a}$$

式中，$(\sigma_f)_m$ 是基质的强度；$(\sigma_f)_r$ 是强化物的强度。如果其中一种材料先发生失效，则由另一种材料承载。因此拉伸强度的下界限值为：

$$(\widetilde{\sigma}_f)_{L,a}=\text{取高值}(f(\sigma_f)_r,(1-f)(\sigma_f)_m) \tag{11.3b}$$

创造各向异性

对于单一块体而言，其弹塑性属性通常呈现微弱的各向异性，基本不依赖于方向。杂化提供了一种创造可控各向异性的方法，且各向异性的值可以很大。图 11.7 所示是一个关于复合材料模量上、下界限值的例子。单向长纤维增强复合材料的纵向性能接近于上界限值，而横向性能则接近于下界限值，两者之间的垂直带宽代表各向异性。在这个例子中，单向连续纤维增强复合材料的最大各向异性值 R_a 可由下式计算得到：

$$R_a=\frac{\widetilde{E}_u}{\widetilde{E}_L}=f^2+(1-f)^2+f(1-f)\left(\frac{E_m}{E_f}+\frac{E_f}{E_m}\right)$$

在图 11.7 中，R_a 的最大值仅为 1.5。第 12 章将会介绍一个涉及热性质的例子，其中，R_a 值更为显著。

由图 11.8b 可知，横向强度的确定更为困难，它取决于交界面的黏着强度、纤维分布、应力集中以及孔洞。通常情况下，横向强度会小于未加强基质的强度，且失效应变

也更小。当连续韧性基质中存有强黏着力且不易变形的颗粒物或纤维时，基质的流动将会受到限制。此时，流动所需要的应力有所增加。拉伸强度的上限值为：

$$\text{取低值}\begin{cases}(\tilde{\sigma}_f)_{u,t}\approx(\sigma_f)_m\left(\dfrac{1}{1-f^{1/2}}\right)\\(\tilde{\sigma}_f)_{u,t}\approx(\sigma_f)_r\end{cases}\qquad(11.4a)$$

由于应力集中以及纤维基质交界面的脱粘，通常情况下横向强度比单独基质的强度要低。霍尔给出了拉伸强度的近似下限值。

$$(\tilde{\sigma}_f)_{L,t}\approx(\sigma_f)_m(1-f^{1/2})\qquad(11.4b)$$

基于这双重极限约束，我们可以对给定强化物与基质的潜力进行充分挖掘。图11.9给出了环氧树脂的轴向强度和横向强度极限。

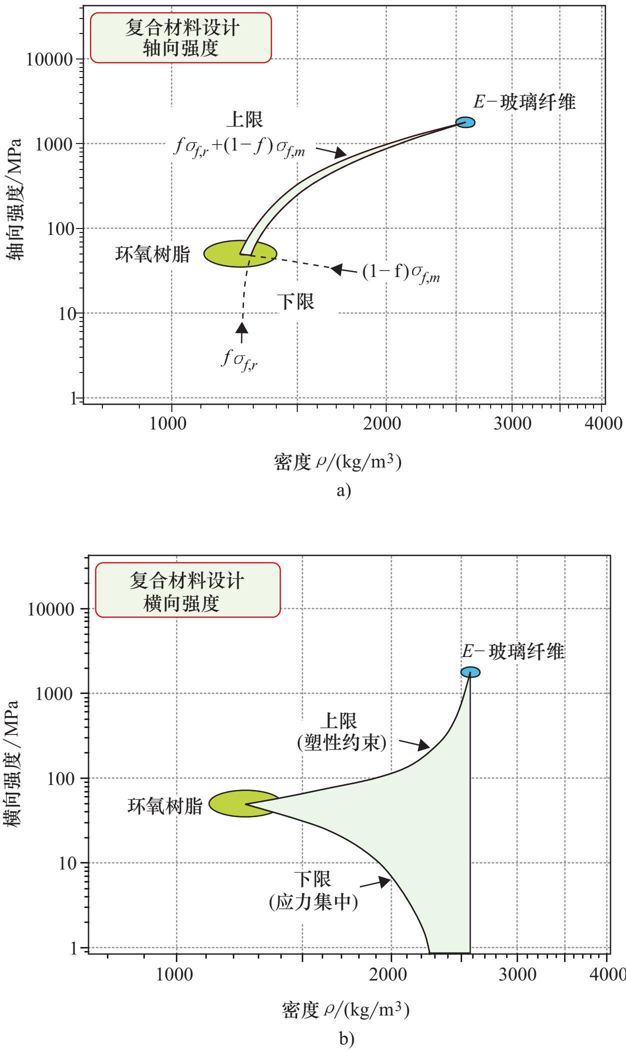


图 11.9 复合材料的轴向强度与横向强度限制

连续纤维增强复合材料在压应力状态下，会因为纤维扭曲（见图 11.8a 最右边所示情况）而失效。扭曲抗力由基质的剪切强度决定，约为$(\sigma_f)_m/2$。由此可知，纤维的

轴向失稳应力为：

$$(\tilde{\sigma}_c)_{u,a}=\frac{1}{\theta}\frac{(\sigma_f)_m}{2}\approx 14(\sigma_f)_m \tag{11.5}$$

式中，θ 是纤维与压缩轴的初始偏差角，用弧度表示。试验表明，对于精心排列的复合材料，典型的初始偏差角为 0.035，由此可得出方程右侧的最终值。对于强度的上限值，我们取该值与式(11.3a)计算结果的较小值。当错位严重时，意味着 $\theta=1$，强度会急剧下降。此时，我们取基质的压缩失效应力$(\sigma_f)_m$ 为强度的下限值。

5. 比热容

固体在常压下的比热容 C_p 与常体积下的比热容 C_v 几乎相同。如果它们是完全相同的，那么复合材料的单位体积热容将会与密度一样，满足下列混合规则：

$$\tilde{\rho}\tilde{C}_p=f\rho_r(C_p)_r+(1-f)\rho_m(C_p)_m \tag{11.6}$$

式中，$(C_p)_r$ 是强化物的比热容；$(C_p)_m$ 是基质的比热容。复合材料加热后，由于热膨胀的作用，各组成分之间会出现失配，因此结果会有微小的不同。失配还会形成局部压应力，导致比热容的改变。但是，这种影响非常小，我们后续不予考虑。

6. 热膨胀系数

复合材料在某些方向的热膨胀会强于其组成分，而在其余方向则要小一些。这是因为主弹性应变之比为弹性常数——泊松比。如果基质在一个方向的扩张被抑制，它在另外一个方向的扩张就会变大。简化起见，我们可利用下式求解热膨胀系数的近似下界限值：

$$\tilde{\alpha}_L=\frac{E_r\alpha_r f+E_m\alpha_m(1-f)}{E_r f+(1-f)E_m} \tag{11.7}$$

当弹性模量相同时，上式可演变为混合规则。热膨胀系数的上界限值为：

$$\tilde{\alpha}_u=f\alpha_r(1+\nu_r)+(1-f)\alpha_m(1+\nu_m)-\alpha_L[f\nu_r+(1-f)\nu_m] \tag{11.8}$$

式中，α_r 和 α_m 分别是强化物和基质的热膨胀系数；ν_r 和 ν_m 是强化物和基质的泊松比。

7. 导热系数

导热系数决定稳态下的热流量。由两种材料通过紧密连接而成的复合材料，其导热系数 λ 介于基质导热系数 λ_m 和强化物导热系数 λ_r 之间。显而易见，连续长纤维增强复合材料在平行于纤维方向的导热系数，可由混合规则计算得到：

$$\tilde{\lambda}_u=f\lambda_r+(1-f)\lambda_m \tag{11.9}$$

该值是一个上界限值。其他方向的导热系数都低于该值，同时其横向导热系数接近下界限值。下界限值可由麦克斯韦准则得出：

$$\tilde{\lambda}_L=\lambda_m\left(\frac{\lambda_r+2\lambda_m-2f(\lambda_m-\lambda_r)}{\lambda_r+2\lambda_m+f(\lambda_m-\lambda_r)}\right) \tag{11.10}$$

颗粒增强复合材料的导热系数接近下界限值。当界面间的热传导很弱时，导热系数会降到下界限以下。界面脱粘或者强化物与基质间存有界面层时会出现这种情况，所以强化物与基质的弹性模量差异不能太大，且复合材料的结构尺寸不能小于声子波长。

8. 热扩散率

热扩散率的定义为：

$$\alpha=\frac{\lambda}{\rho C_p}$$

对于瞬态热流，也就是当温度场随时间而变化时，热扩散率决定热流量。热扩散率由之前提到的三个性能参数组成：导热系数 λ、密度 ρ 和比热容 C_p。将式（11.1）和式（11.6）代入上式，可得到热扩散率的新表达式：

$$\tilde{\alpha}=\frac{\tilde{\lambda}}{f\rho_r(C_p)_r+(1-f)\rho_m(C_p)_m} \quad (11.11)$$

热扩散率的上界限与下界限可将 $\tilde{\lambda}$ 的上界限与下界限（见式（11.9）和式（11.10））代入上式即可计算得到。

基于热响应控制的复合材料设计

热力学设计会涉及比热容 C_p、热膨胀系数 α、导热系数 λ 和热扩散率 a。复合材料这些性能的上、下界限可由式(11.6)~式(11.11)加以确定，同时需借助一系列的指标。最小化热变形，即第6章6.16节提到的最大化指标 λ/α，是其中一个指标。

图11.10给出了部分热膨胀系数 α 与导热系数 λ 性能空间图，标有卓越准则 λ/α 对应的等高线。图中给出了三种材料：铝、氮化硼和碳化硅。根据前述上、下界限的计算公式，图中绘制了 Al-BN 和 Al-SiC 复合材料热性能的上、下界限包络线。由于 λ 和 α 各自具有上、下界限，因而所构成的每种复合材料均有四种上、下界限组合。图11.10给出的包络线代表最外面的一组。由图可知，将 SiC 作为强化物置入铝基可增大 λ/α 值，而氮化硼强化物则会减小 λ/α 值。

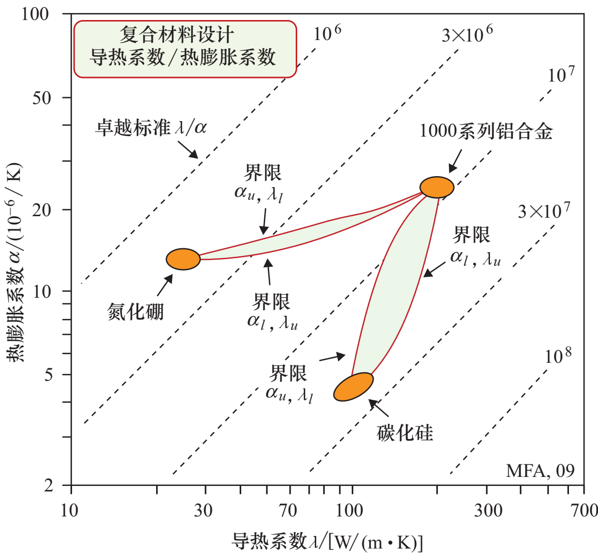


图 11.10 部分热膨胀系数 α—导热系数 λ 的性能空间图，给出了铝合金、氮化硼和碳化硅三种材料（其中 Al-BN 和 Al-SiC 复合物的性能由式(11.7)~式(11.10)界定。前者降低了性能，而后者加强了性能。）

9. 介电常数

介电常数$\tilde{\varepsilon}_d$可由如下混合规则进行计算：

$$\tilde{\varepsilon}_d = f\varepsilon_{d,r} + (1-f)\varepsilon_{d,m} \tag{11.12}$$

式中，$\varepsilon_{d,r}$和$\varepsilon_{d,m}$分别是强化物与基质的介电常数。

10. 电导率和渗流

当复合材料各组成分的电导率 κ 在相同量级时，电导率的界限值可采用界定导热系数的类似方式确定，只需将 λ 换为 κ 即可。相反，当量级差别很大（比如金属粉末均匀分散在绝缘聚合物内的情况）时，渗流问题会显现出来。这将在本书第 12 章 12.3 节中加以讨论。

11. 复合材料在性能空间中的填补

最后，我们以两幅图来展示复合材料的发展是如何填补材料性能空间的。首先，图 11.11 对应弹性模量 E—密度 ρ 图。浅红和浅蓝的包络区域对应未强化金属和聚合物，贴有灰色标签（它们取自图 4.3）。聚合物基复合材料对应紫色区域，金属基复合材料对应暗红色区域。这两个区域在第 4 章的图 4.3 中都属于空白区域。将用于轻质高刚度结构设计的任意一个指标（E/ρ、$E^{1/2}/\rho$ 和 $E^{1/3}/\rho$）作为卓越标准，我们可以发现复合材料所能提供的性能是之前所无法企及的。

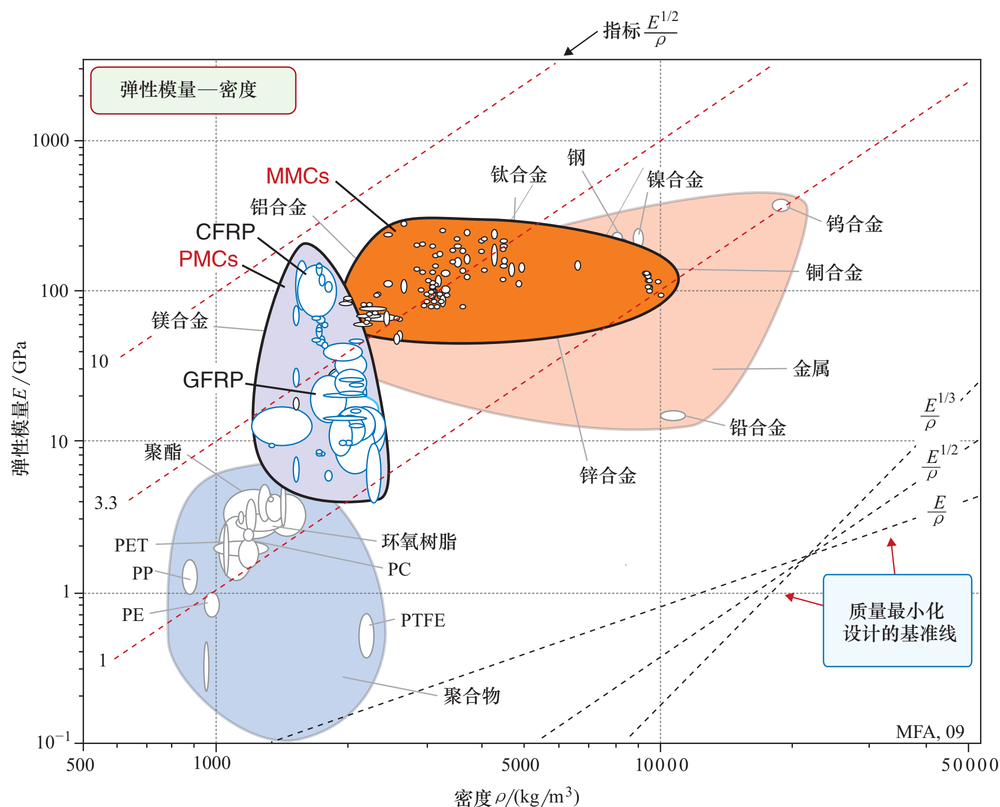


图 11.11 聚合物复合材料与金属基复合材料扩展了原有的弹性模量—密度图的区域（标有 PMCs 和 MMCs 的包络区域内的小圈均代表一种复合材料。数据来源于 CES Edu'09 数据库。）

图 11.12 和图 4.4 强度 σ_f 与密度 ρ 的关系图部分相似。图 11-12 中各部分颜色与图 11.11 的相同。复合材料再次在某个方向上扩展了材料密集区，将用于轻质高强度结构设计的任意一个指标（σ_f/ρ，$\sigma_f^{2/3}/\rho$，$\sigma_f^{1/2}/\rho$）作为卓越指标，可提供增强性能。

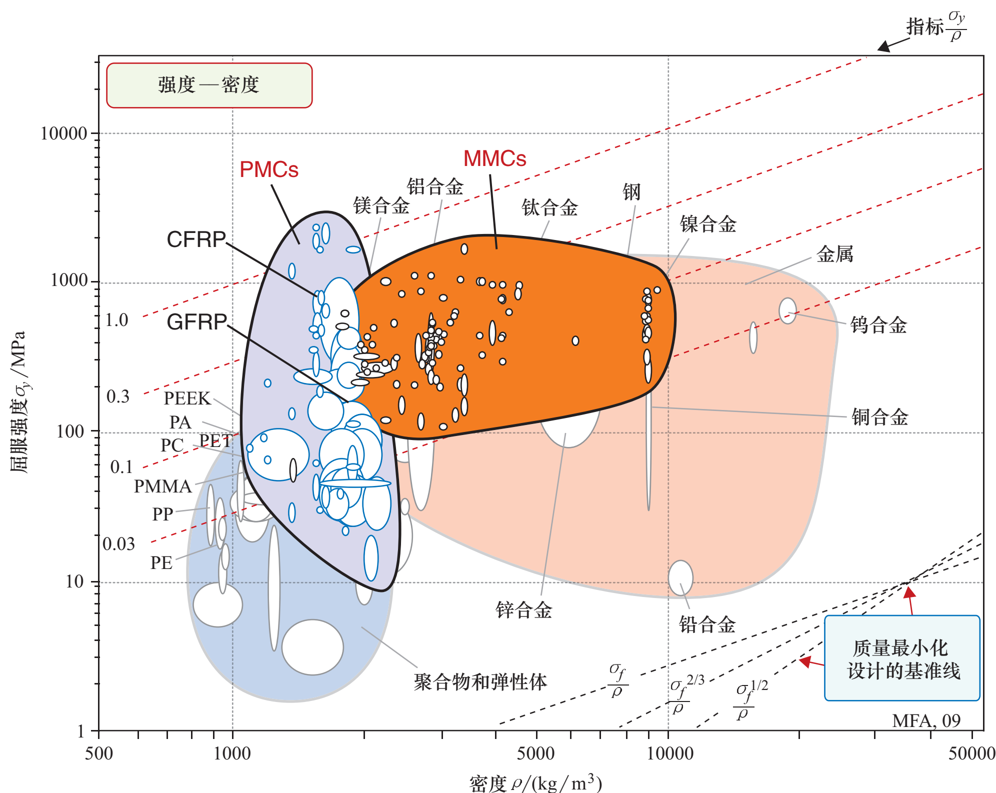


图 11.12 聚合物复合材料与金属基复合材料也扩展了原有的强度-密度图的区域（标有 PMC_s 和 MMC_s 的包络区域内的小圈均代表一种复合材料。数据来源于 CES Edu’09 数据库。）

11.5 夹层结构

夹层板是杂化概念的典范。在特定几何形状和尺寸下，将两种材料连接在一起，其中一种材料形成两个面，另一种形成芯部，从而在轻质条件下确保结构的弯曲刚度和强度。利用芯部材料将两个面隔开，导致截面的转动惯量 I 和截面系数 Z 增加，从而使这种结构能抵抗弯曲和屈曲载荷。夹层结构常用于质量需严格控制的情况，如飞机、火车、机动车、便携式结构以及运动器材。大自然中也存在很多夹层结构的设计，如人类骨头、鸟翅膀，很多植物的茎和叶都是外部实心表面内里是低密度泡沫状物质。

这些面的厚度均为 t，承受大部分载荷，所以它们必须有足够的强度和刚度。由于它们是平板的外部面，所以它们必须适应周围环境。芯部区域厚度为 c，占据大部分的体积。它必须要轻质，且有足够的刚度和强度来承受必要的剪切应力，使整块板能作为一个承载单元。如果芯部区域比外部面厚很多，那么这些应力会很小。

到目前为止，我们将夹层结构称为一种结构。材料 A 构成外表面，材料 B 置于芯

部区域起支撑作用，每一种材料都有其密度、弹性模量和强度。但是，我们同样可以将它视为一种材料，有其特有的性能，便于与其他传统材料进行比较。为此，我们计算了夹层结构的等效材料性能，如同复合材料一样，采用鼻音化符号，如$\widetilde{E}$和$\widetilde{\rho}$。这些量可绘制在弹性模量—密度图上，从而能够与图中的其他材料做直接比较。所有材料指标的构造过程保持不变。本节的一些符号定义见表 11.2。

表 11.2 符号

符号	含义和常用单位
t,c,d	面板厚度，芯部厚度，整体的板料厚度/m
L,b	板的长度和宽度/m
m_a	板单位面积的质量/(kg/m^2)
$f=2t/d$	面板占据的相对体积
$(1-f)=c/d$	芯部占据的相对体积
I	截面惯性矩/m^4
ρ_f,ρ_c	面板材料和芯部材料的密度/(kg/m^3)
$\widetilde{\rho}$	板的等效密度/(kg/m^3)
E_f	面板的弹性模量/(GN/m^2)
E_c,G_c	芯部的弹性模量和剪切模量/(GN/m^2)
$\widetilde{E}_{in\text{-}plane},\widetilde{E}_{flex}$	板的等效面内模量和弯曲模量/(GN/m^2)
σ_f	面板的屈服强度/(MN/m^2)
σ_c,τ_c	芯部的屈服强度和剪切强度/(MN/m^2)
$\widetilde{\sigma}_{in\text{-}plane}$	板的等效面内强度/(MN/m^2)
$\widetilde{\sigma}_{flex1},\widetilde{\sigma}_{flex2},\widetilde{\sigma}_{flex3}$	板的等效弯曲强度，取决于失效机制/(MN/m^2)

11.5.1 借助试验确定结构材料的等效性能

设想一种夹层结构，外表面是实体面，芯部呈蜂窝状。平板的等效密度是质量与体积之比（m_a/d），其中 m_a 是单位面积的质量，$d=2t+c$ 是总体厚度。弯曲刚度为 EI，可以通过对板施加弯曲载荷，并测量其偏移量得到。我们假定一种等效匀质材料，尺寸与真实的板一致，它的$\widetilde{\rho}=\rho$，$\widetilde{E}\widetilde{I}=EI$，其中$\widetilde{I}=bd^3/12$ 是匀质平板的惯性矩。等效密度和弹性模量分别如下：

$$\widetilde{\rho}=\frac{m_a}{d} \tag{11.13}$$

$$\widetilde{E}=\frac{12EI}{bd^3} \tag{11.14}$$

将平板加载至失效，此时可测得破坏力矩 M_f。接着，可通过$\widetilde{Z}\sigma_{flex}=M_f$计算等效抗弯强度，其中$\widetilde{Z}=b\ d^2/4$ 是平板的截面系数。因此，等效抗弯强度为：

$$\widetilde{\sigma}_{flex}=\frac{4M_f}{bd^2} \tag{11.15}$$

下面我们通过一个简单的例子来说明这种方法。

波音飞机地板用碳芳纶夹层板的测试结果如下：

面板材料：0.25mm 的碳/酚醛。

芯部材料：3.2mm，密度为 147kg/m³的芳纶蜂窝。

单位面积平板质量 m_a：2.69kg/m²。

板长 L：510mm。

板度 b：51mm。

板厚 d：10.0mm。

弯曲刚度 EI：122N/m²。

破坏力矩 M_f：196N/m。

由式(11.13)可得出等效密度：

$$\tilde{\rho}=\frac{m_a}{d}=269\text{kg/m}^3$$

等效弹性模量 $\tilde{E}$ 可由式(11.14)得出：

$$\tilde{E}=\frac{12EI}{bd^3}=28.8\text{GPa}$$

等效抗弯强度 $\tilde{\sigma}_{flex}$ 可由式(11.15)得出：

$$\tilde{\sigma}_{flex}=\frac{4M_f}{bd^2}=154\text{MPa}$$

11.5.2 基于分析的夹层结构的等效性能

在这一节中，我们将建立夹层板的刚度和强度方程，并将其表述为等效匀质材料的性能。表 11.2 给出了相关符号的定义。

等效密度

夹层结构的等效密度（质量与体积比）为：

$$\tilde{\rho}=f\rho_f+(1-f)\rho_c \qquad (11.16)$$

式中，f 是面板体积分数，可由 $f=2t/d$ 计算得到。

1. 力学性能

夹层板在承受弯曲载荷时需保证足够的刚度和强度。为了将平板视为一种材料，我们必须将平面弹性模量和平面强度从弯曲模量及强度中区分出来。等效平面弹性模量$\tilde{E}_{in\text{-}plane}$和等效平面强度$\tilde{\sigma}_{in\text{-}plane}$可由混合规则近似计算得到。

2. 等效弯曲模量

弯曲性能的差异很大。抗弯性（刚度的倒数）主要由两部分贡献组成：其一是平板的整体弯曲，其二为芯部的剪切（见图 11.14）。二者叠加在一起，构成弯曲刚度：

$$EI=\frac{b}{12}(d^3-c^3)E_f+\frac{bc^3}{12}E_c$$

抗剪刚度为：

$$AG=\frac{bd^3}{c}G_c$$

式中，d，c，t 和 L 等尺寸都可以从图 11.13 中读出。E_f是面板的弹性模量；G_c是芯部材料的剪切模量；A 是横截面面积。

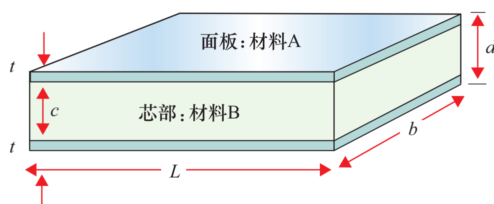


图 11.13 夹层板（面板厚度为 t，芯部厚度为 c，整个平板厚度为 d。）

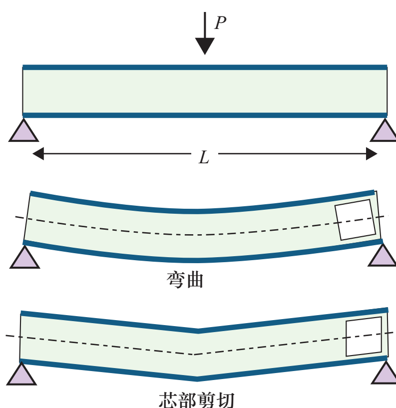


图 11.14 夹层板的弯曲刚度由整体弯曲和芯部的剪切组合而成

总偏差为：

$$\delta=\frac{12PL^3}{B_1 b[(d^3-c^3)E_f+c^3E_c]}+\frac{PLc}{B_2 d^2 bG_c} \tag{11.17}$$

常数 B_1 和 B_2 由受载情况决定，见表 11.3。将式（11.17）与等效材料的总偏差 $\delta=\dfrac{12PL^3}{\widetilde{E}d^3b}$ 相比，可得：

$$\frac{1}{\widetilde{E}_{flex}}=\frac{1}{12}\frac{1}{E_f\left[(1-(1-f)^3)+\dfrac{E_c}{E_f}(1-f)^3\right]}+\frac{B_1}{B_2}\left(\frac{d}{L}\right)^2\frac{(1-f)}{G_c} \tag{11.18}$$

需要注意：式(11.18)除了弯曲—剪切平衡项$(d/L)^2$，等效性能与宏观尺寸无关；唯一的变量是面板体积分数 f。弯曲刚度由$\widetilde{E}\widetilde{I}$确定，其中$\widetilde{I}$是匀质平板的惯性矩（$\widetilde{I}=b\,d^3/12$）。

表 11.3 描述受载状况的常数

载荷类型	描述	B_1	B_2	B_3	B_4
	悬臂梁，末端荷载	3	1	1	1
	悬臂梁，均布载荷	8	2	2	1
	三点弯曲，中央负载	48	4	4	2
	三点弯曲，均布载荷	384/5	8	8	2
	两端内置，中央负载	192	4	8	2
	两端内置，均布载荷	384	8	12	2

3. 等效抗弯强度

夹层结构有多种失效形式（见图 11.15）。多种失效机制间相互竞争，通常所需失效载荷最低的失效机制占主导地位。这里，我们计算每种模式的等效抗弯强度，然后找出其最小值。

4. 面板屈服

夹层板的整体塑性弯矩为：

$$M_f=\frac{b}{4}[(d^2-c^2)\sigma_f+c^2\sigma_c]$$

将上式代入式(11.15)，同时引入 $c/d=(1-f)$ 这样一组关系，可得到面板以屈服为主要失效机制时的等效失效强度：

$$\tilde{\sigma}_{flex1}=[1-(1-f)^2]\sigma_f+(1-f)^2\sigma_c \quad (11.19)$$

由上述方程可知，等效失效强度与尺寸无关。

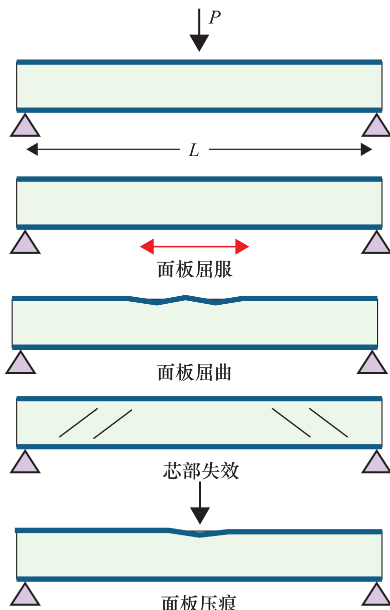


图 11.15 弯曲载荷下夹层板的失效形式

5. 面板屈曲

在弯曲状态下，夹层结构的一块面板处于压缩状态（见图 11.16）。一旦它发生屈曲，则夹层结构就会失效。面板的屈曲应力为：

$$\sigma_b=0.57(E_fE_c^2)^{1/3} \quad (11.20)$$

屈曲只在面板很薄且芯部支撑很小时才会发生。失效弯矩可近似为：

$$M_f=2\sigma_b tbc=1.14(E_fE_c^2)^{1/3}tbc$$

结合式（9.2）可得：

$$\tilde{\sigma}_{flex2}=1.14f(E_fE_c^2)^{1/3} \quad (11.21)$$

6. 芯部剪切

芯部剪切（见图 11.17）导致失效时，其所受的载荷为：

$$P_f=B_4bc\left(\tau_c+\frac{t^2}{cL}\sigma_f\right)$$

式中，第一项由芯部剪切引起；第二项源自塑性铰的形成。

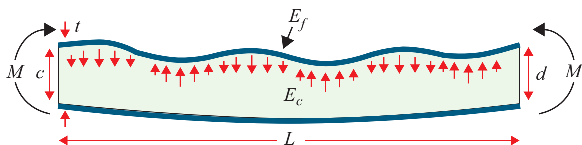


图 11.16 面板屈曲

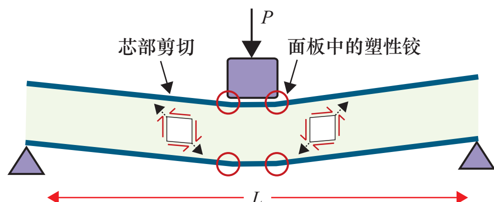


图 11.17 芯部剪切

$$P_f=\frac{B_3b\,d^2}{4L}\tilde{\sigma}_3$$

当失效由剪切主导时，夹层板的等效强度为：

$$\tilde{\sigma}_{flex3}=\frac{B_4}{B_3}\left[4\frac{L}{d}(1-f)\tau_c+f^2\sigma_f\right] \quad (11.22)$$

常数 B_3 和 B_4 由受载情况决定，见表 11.3。当芯部材料大致上为各向同性时，τ_c 可由 $\sigma_c/2$ 代替。否则，只能使用 τ_c。

7. 压痕

压痕应力 $P_{ind}=P/a$，可由下式计算得到：

$$\frac{F}{ab}=p_{ind}=\frac{2t}{a}(\sigma_\gamma^f\sigma_\gamma^c)^{1/2}+\sigma_\gamma^c \quad (11.23)$$

基于上式，我们可以得到避免压痕的面板最小厚度。

8. 夹层结构的功效

图 11.18 和图 11.19 给出了夹层板与单一材料的性能对比。图 11.18 给出的是夹层板的等效密度$\tilde{\rho}$和等效弯曲模量$\tilde{E}$，利用表 11.4 中的数据代入式(11.16)和式(11.18)计算得到。此处的夹层板由 CFRP 面板及高性能的泡沫芯按不同比率组成。在给定 d/L 值的情况下，取不同比率的 $2t/d$，可形成图 11.18 所示的轨迹线。由于剪切和弯曲变形的共同作用，轨迹线呈双曲线增长方式。由曲线可知，轻质高刚度板的指标为：

$$M_3 = \frac{E^{1/3}}{\rho}$$

从比刚度的角度来看，最佳面板对应的指标值对应与轨迹相切的等高线。由图可知，最佳面板对应 $f \approx 0.04$ 的情况。此时，最佳面板的质量要比相同刚度情况下的 CFRP 实心板轻 2.8 倍。换句话说，最佳面板的刚度比相同质量的 CFRP 实心板高 22 倍。

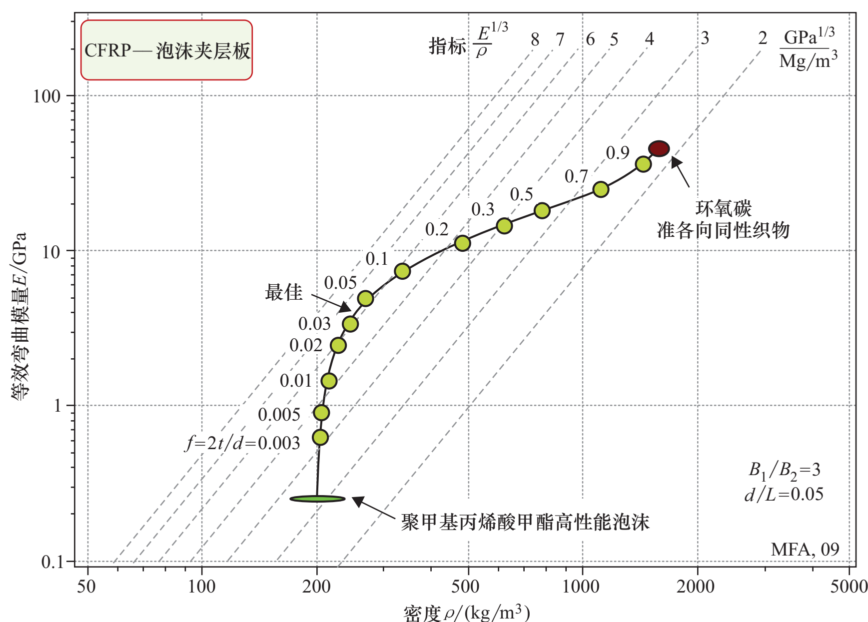


图 11.18　CFRP 泡沫夹层板的等效弯曲模量和密度与单一材料相关性能的对比图
（借助指标 $E^{1/3}/\rho$ 可优化夹层板的面板体积分数。）

我们可以采用上述类似方法来处理夹层板的等效抗弯强度问题（见图 11.19），但对于强度而言，存在多种机制相互竞争的情况。因此，我们取$\tilde{\sigma}_{flex1}$、$\tilde{\sigma}_{flex2}$和$\tilde{\sigma}_{flex3}$中的最小值作为等效失效强度。这三个值可分别由式(11.19)、式(11.21) 和式(11.22)计算得到。对于本例而言，当 $f<0.025$ 时，面板屈曲是主要的失效形式；当 f 从 0.025 慢慢上升到 0.1 时，主要失效形式从面板屈服慢慢演变为芯部剪切。图中的包络线标示了 CFRP 泡沫夹层板可以达到的强度，并能与单一材料直接对比。图中等高线对应轻质高强结构的指标：

$$M_6 = \frac{\sigma_f^{1/2}}{\rho}$$

该指标所衡量的是当抗弯强度为主要设计要求时材料的效率。最优解位于对应 $f=0.1$ 的数据点的下方，其质量比同样强度的 CFRP 实心板轻两倍。换句话说，在相同质量下，强度是后者的 4 倍。

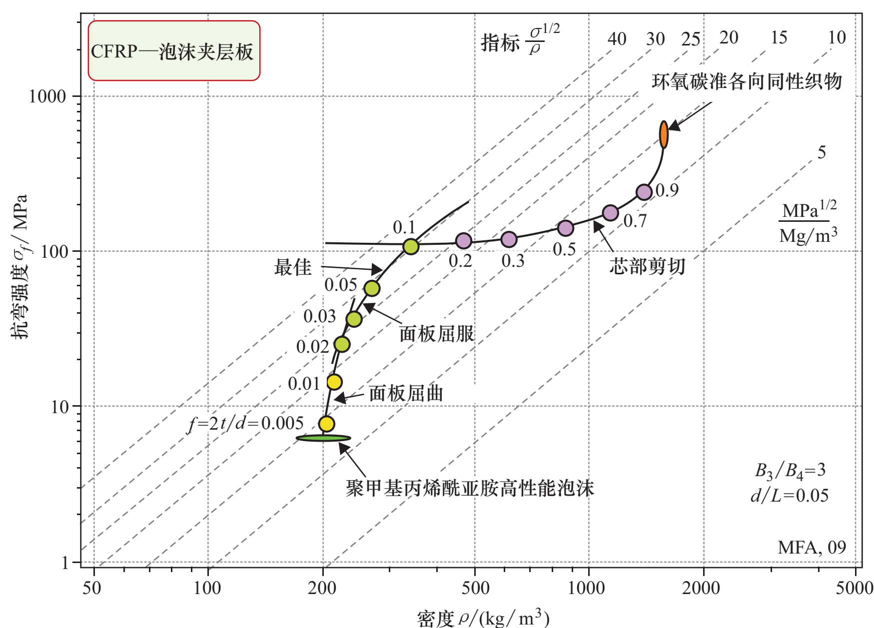


图 11.19 CFRP 泡沫夹层板的等效抗弯强度和密度与单一材料相关性能的对比图

(包络线给出了多种失效形式中的最低失效强度。对应指标 $\sigma_f^{1/2}/\rho$ 的等高线可用于优化夹层板的面板体积分数。图中最小的厚度比 $2t/d$ 对应压痕失效。)

夹层板面板和芯部的性能数据见表 11.4。

表 11.4 夹层板面板和芯部的数据

面板和芯部材料	密度 ρ (kg/m^3)	弹性模量 E/GPa	强度 σ_f/MPa
环氧碳准各向同性织物	1570	46	550
聚甲基丙烯酰亚胺高性能泡沫	200	0.255	6.8

由于压痕的产生与压头的接触面积密切有关，属于一种局部失效机制，因此并没有参与到前述的竞争中。通过预估压入载荷与面积的最坏情况，我们可以利用式(11.23) 得到所需 t/d 值的下限。该下限值会被用作前述轨迹线的约束条件。

9. 热性能

热性能也以类似方式处理。比热容 C_p 满足式 (11.6) 所示的混合规则。面内导热系数 $\lambda_{//}$ 也遵循式(11.9)所示规则。厚度方向导热系数 $\lambda_\perp$ 可由调和平均值得到：

$$\tilde{\lambda}_\perp=\left(\frac{f}{\lambda_f}+\frac{(1-f)}{\lambda_c}\right)^{-1} \tag{11.24}$$

由于面板和芯部材料的热膨胀系数不同，因此面内的热性能十分复杂。但是，由于面板和芯部材料被紧密粘接在一起，因此必须承受相同的应变。基于这样一个限制条件，我们可获知面内热膨胀系数为：

$$\widetilde{\alpha}_{//}=\frac{fE_f\alpha_f+(1-f)E_c\alpha_c}{fE_f+(1-f)E_c} \tag{11.25}$$

厚度方向热膨胀系数相对简单，可由下式给出：

$$\widetilde{\alpha}_{\perp}=f\alpha_f+(1-f)\alpha_c \tag{11.26}$$

厚度方向热扩散率不是固定值，会随着时间而变化。在短时间内，热量不会渗透至芯部，此时厚度方向热扩散率是面板的厚度方向热扩散率。但随着时间的推移，其值趋近于$\widetilde{\lambda}/\widetilde{\rho}\,\widetilde{C}_p$。

10. 电性能

与复合材料一样，夹层板的介电常数可由式(11.12)所示的混合规则计算得到。聚合物泡沫的介电常数很小，因此由CFRP面板和聚合物泡沫组成的夹层板具有很高的刚度和强度，且介电常数极小。面内的电性能同样满足混合规则。与热性能一样，厚度方向电性能采用调和平均值来描述，其计算公式等同于式(11.24)。

11. 夹层板在性能空间中的填补

与之前一样，我们以两幅图来展示夹层结构是如何填补材料性能空间的。图11.20给出了部分的弯曲模量—密度图表，浅色包络区域包含金属、聚合物、陶瓷、复合材

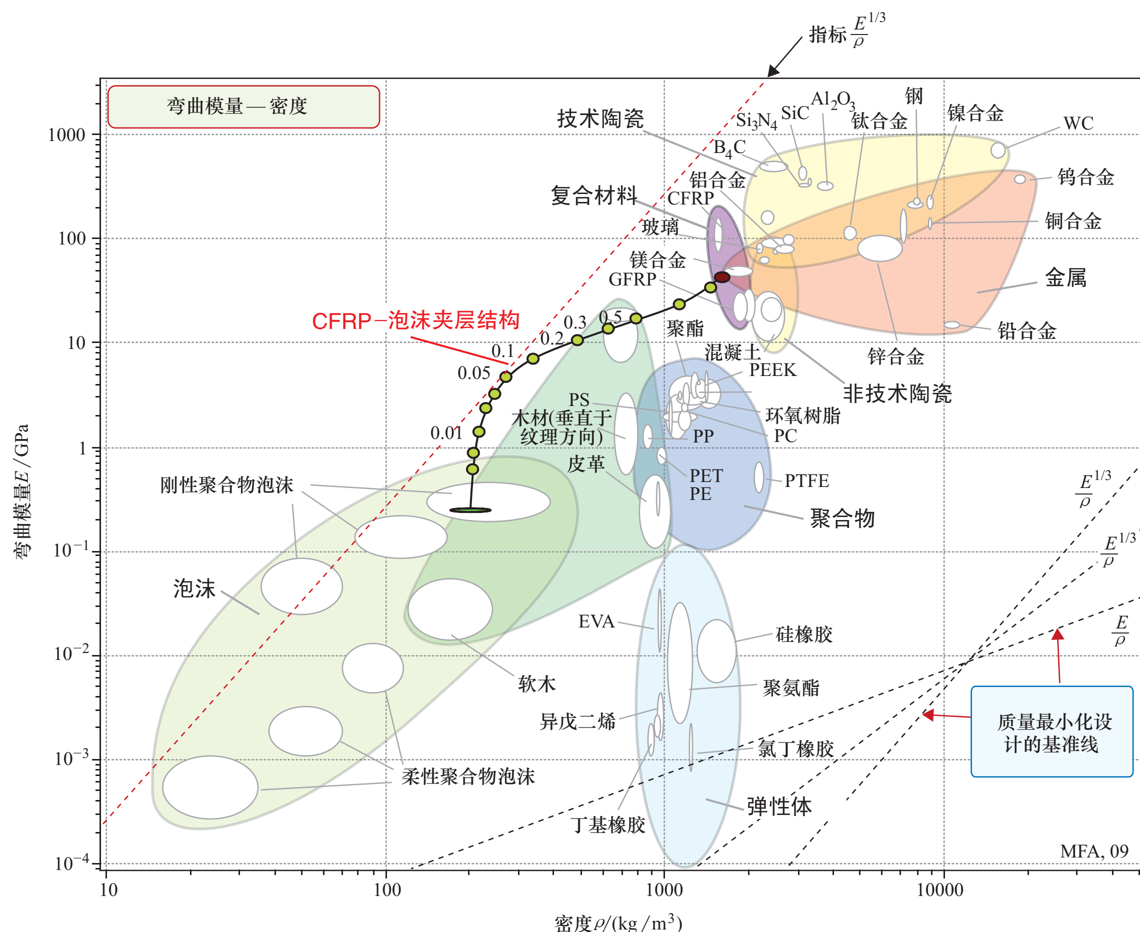


图11.20　叠加了图11.20中夹层板数据的弯曲模量与密度关系图

料以及泡沫，贴有灰色标签。此外，图中绘制了 CFRP-泡沫夹层板的刚度与密度轨迹线。对应 $0.01<f<0.2$ 的夹层板进入了此前空白的区域。借助轻质高刚度平板的材料指标 $E^{1/3}/\rho$ 作为卓越标准，我们可以发现，夹层板能够提供前所未有的性能。

图 11.21 围绕抗弯强度—密度图表描述了类似的情况。色彩模式与图 11.20 一样，图中叠加了图 11.19 中的抗弯强度—密度轨迹线。借助轻质高强度平板的材料指标 $\sigma_f^{1/2}/\rho$ 作为卓越标准，可以发现夹层板在某个方向上扩展了填补区域，可提供增强性能。

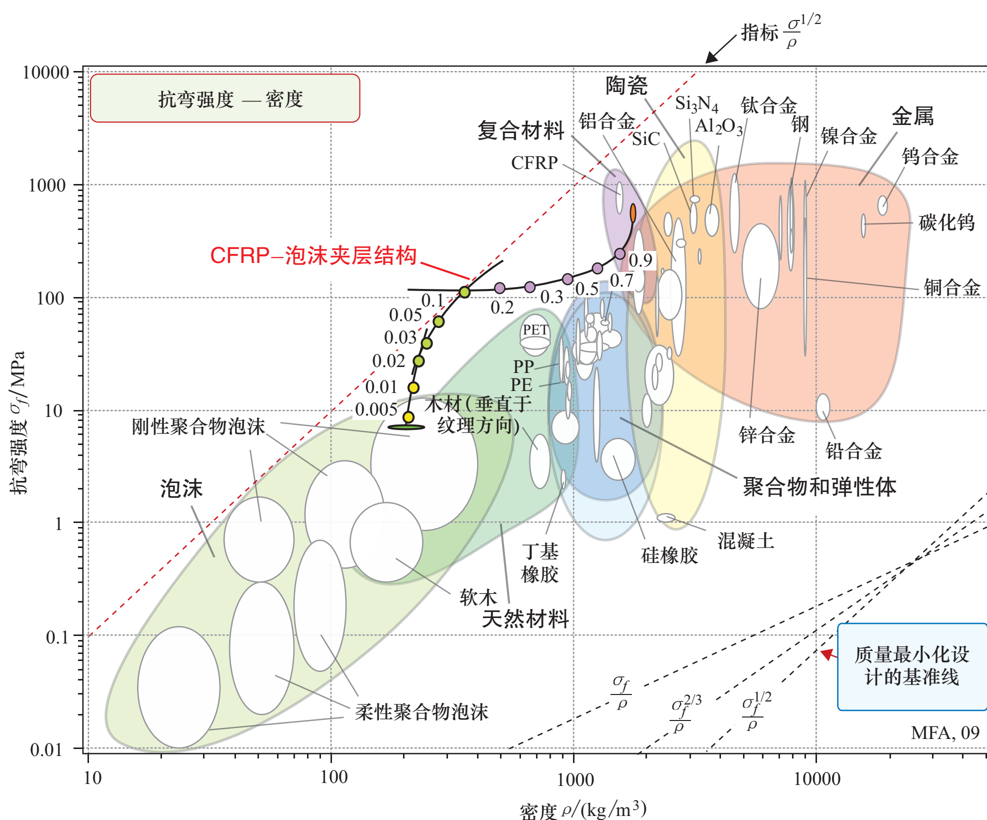


图 11.21　叠加了图 11.19 中夹层板数据的抗弯强度—密度图

11.6　多孔结构：泡沫和晶格

多孔结构，如泡沫和晶格，是实体与气体的混合物。气体的性能可能看起来无关紧要，但实际并非如此。绝缘低密度泡沫的导热性能由其空隙中气体的传导性能决定。介电常数以及击穿电压，甚至是压缩性能都取决于气体性能。

多孔实体可分为两大类，它们最大的区别在于力学性能。首先，以泡沫为代表，是弯曲主导型结构；其次，以三角形晶格结构为代表，是拉伸主导型结构。这会在后面章节中重点阐述。为进一步阐明它们的区别：相对密度为 0.1 的泡沫（意味着实体元胞的体积分数为 10%）相对于同样密度的三角形晶格来说，刚度降低 10 倍。因此，构型在这儿非常重要。

11.6.1　泡沫：弯曲主导型结构

泡沫是一种多孔实体，通过将发泡剂充入聚合物、金属、陶瓷或玻璃制成。发泡剂是一种引入气体的通用术语，主要用于制作面包。图 11.22 为低密度泡沫的理想化元胞模型，包含围绕于气体或液体的胞壁或胞边。多孔实体以相对密度来描述，定义如下：

$$\frac{\tilde{\rho}}{\rho_s} \approx \left(\frac{t}{L}\right)^2 \tag{11.27}$$

式中，$\tilde{\rho}$是泡沫的密度；ρ_s 是实体密度；L 是元胞模型的尺寸；t 是元胞边的厚度。

当在泡沫上施加载荷时，元胞壁会弯曲，其产生的后果我们需加以分析。

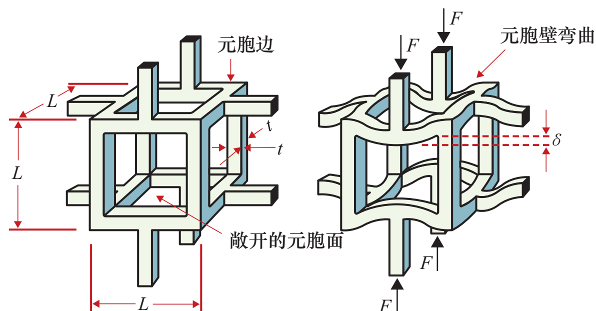


图 11.22　低密度泡沫的元胞

（当泡沫受载时，元胞壁会发生弯曲，因此是低模量结构。）

1. 力学性能

图 11.23 给出了泡沫的压应力—应变曲线。由图可以看出，材料发生线弹性变形（弹性模量为$\tilde{E}$）直至弹性极限，此时元胞壁发生屈服、屈曲或断裂。随后，泡沫在应力几乎不变的情况下继续变形，直到元胞的对边相互碰撞，应力开始急剧上升。力学性能的计算方式将会在后续章节中详述，具体细节可参考扩展阅读。

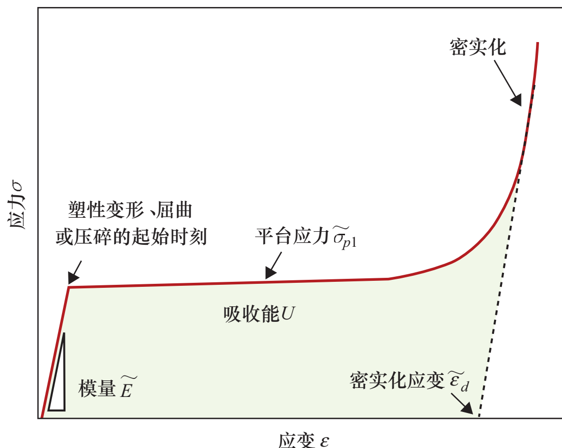


图 11.23　平台应力由元胞壁的屈曲、塑性弯曲或断裂所确定

远场压缩应力 σ 施加在元胞边的力为 $F \propto \sigma L^2$，导致其弯曲，弯曲变形量为 δ，如图 11.22 所示。对于开孔结构，弯曲变形量为：

$$\delta \propto \frac{FL^3}{E_s I} \tag{11.28}$$

式中，E_s 是泡沫实体的弹性模量；$I = \dfrac{t^4}{12}$ 为方形截面元胞壁的截面惯性矩。元胞的整体压缩应变为 $\varepsilon = 2\delta/L$。将上述结果代入下式，可得到泡沫的弹性模量 $\widetilde{E} = \sigma/\varepsilon$ 为：

$$\frac{\widetilde{E}}{E_s} \propto \left(\frac{\widetilde{\rho}}{\rho_s}\right)^2 \quad \text{（弯曲主导）} \tag{11.29}$$

因为 $\widetilde{E} = E_s$，当 $\widetilde{\rho} = \rho_s$ 时，我们推测比例常数接近 1，这个推测已经被试验和模拟证实。由于上式中密度项是二次方项，一个微小的变化会导致弹性模量的较大变化（见图 11.24a）。

类似的方法也可以用于计算泡沫的平台应力。如图 11.25a 所示，当施加在元胞壁上的力超过最大塑性弯矩（参考附录 A 式（A.4））时，元胞壁发生屈服。

$$M_f = \frac{\sigma_s t^3}{4} \tag{11.30}$$

式中，σ_s 是泡沫实体的屈服强度。塑性弯矩与远场应力满足 $M \propto FL \propto \sigma L^3$ 的关系。将这些方程加以组合，可得到泡沫的失效强度 $\widetilde{\sigma}_{pl}$ 为：

$$\frac{\widetilde{\sigma}_{pl}}{\sigma_{f,s}} = C\left(\frac{\widetilde{\rho}}{\rho_s}\right)^{3/2} \text{（弯曲主导）} \tag{11.31}$$

式中，比例常数 $C \approx 0.3$，既可以通过试验获得，也可以通过模拟获得。

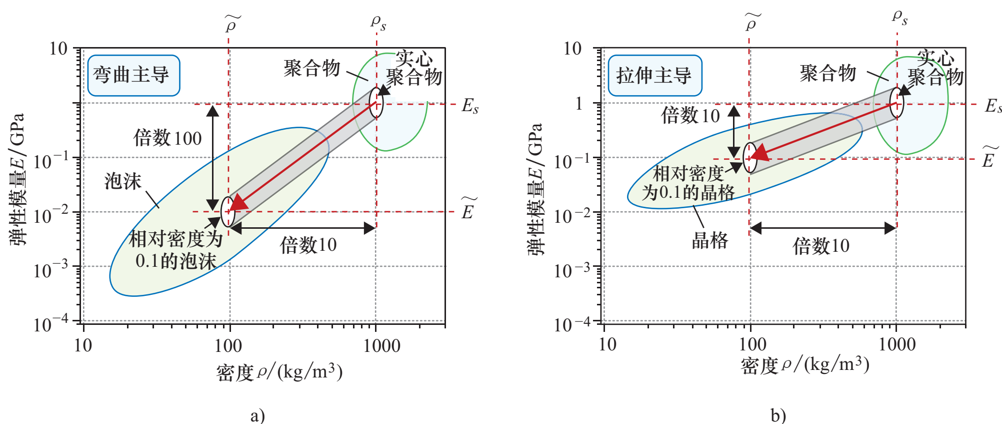


图 11.24 泡沫的弯曲主导型结构和拉伸主导型结构

a）泡沫可形成低弹性模量、低密度的弯曲主导型结构

b）在相同密度下，晶格结构可形成比泡沫模量更大的拉伸主导型结构

泡沫失效不是因为屈服，而是因为弹性屈曲；脆性泡沫则是因为元胞壁的断裂（见图 11.25b 和 c）。对于塑性失效，简单比例法则就可以很好的描述。当应力超过 $\widetilde{\sigma}_{el}$

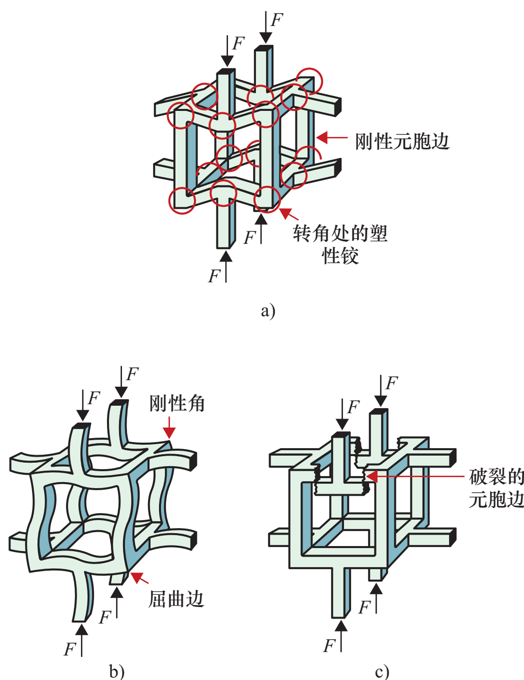


图 11.25　泡沫失效形式

a）由塑性材料制成的泡沫受载超过弹性极限时，元胞边沿发生塑性弯曲

b）泡沫在受载超过弹性极限时，元胞边会发生弹性屈曲

c）脆性泡沫失效是因为元胞边发生连续压裂

时，屈曲失效（详见附录 B 中的表 B.5）发生。$\widetilde{\sigma}_{el}$可由下式获得：

$$\frac{\widetilde{\sigma}_{el}}{E_s} \approx 0.05\left(\frac{\widetilde{\rho}}{\rho_s}\right)^2 \tag{11.32}$$

当应力超过$\widetilde{\sigma}_{cr}$时，元胞壁出现裂纹：

$$\frac{\widetilde{\sigma}_{cr}}{\sigma_{cr,s}} \approx 0.3\left(\frac{\widetilde{\rho}}{\rho_s}\right)^{3/2} \tag{11.33}$$

式中，$\widetilde{\sigma}_{cr,s}$是元胞壁材料的抗弯强度。当应力迅速升高时，密实化是一种纯粹的几何效应。元胞的对边相互接触后无法再进一步弯曲或屈曲。密实化应变$\widetilde{\varepsilon}_d$ 为：

$$\widetilde{\varepsilon}_d \approx 1-1.4\left(\frac{\widetilde{\rho}}{\rho_s}\right) \tag{11.34}$$

泡沫通常用于缓冲器和包装以防止产品受冲击。单位体积泡沫可吸收的能量为：

$$\widetilde{U} \approx \widetilde{\sigma}_{pl}\widetilde{\varepsilon}_d \tag{11.35}$$

式中，$\widetilde{\sigma}_{pl}$为平台应力，即泡沫屈服强度、抗弯强度或断裂强度中的最小值。

这种特性并不局限于图 11.22 所示的理想化结构的开孔泡沫，大部分闭孔泡沫也遵循这些比例法则。初看之下这并不是我们期待的结果，因为当元胞受载时，元胞面

会承载膜应力，会导致元胞刚度和强度对相对密度的线性依赖。对于这个问题我们可以这么理解：元胞面很薄，它们的屈曲或断裂应力很小，对刚度和强度的贡献也很小，因此大部分载荷都由元胞壁所承受。

2. 热性能

泡沫的比热容由实体和气体两部分共同组成，可由混合规则计算得到，单位为 $J/(m^3 \cdot K)$。开孔泡沫的热膨胀系数与其实体材料的热膨胀系数一样。虽然严格来说闭孔泡沫的热膨胀系数也一样，但对于低密度泡沫来说，由于元胞内气体的膨胀会扩大泡沫本身，因此热膨胀系数会明显升高。

对于大多数泡沫来说元胞很小，使得元胞内的气体对流被完全抑制，因此泡沫的导热系数是元胞壁以及元胞内蒸馏气体导热系数之和，近似为：

$$\tilde{\lambda}=\frac{1}{3}\left(\left(\frac{\tilde{\rho}}{\rho_s}\right)+2\left(\frac{\tilde{\rho}}{\rho_s}\right)^{3/2}\right)\lambda_s+\left(1-\left(\frac{\tilde{\rho}}{\rho_s}\right)\right)\lambda_g \tag{11.36}$$

式中，λ_s、λ_g 分别是实体和气体的导热系数。对于干燥空气，导热系数为 $0.025W/(m \cdot K)$。等式中与气体相关的项十分重要。泡沫要想获得好的绝热效果，发泡剂的 λ_g 值应尽可能小。

3. 电性能

绝缘泡沫的独到之处在于其介电常数 $\tilde{\varepsilon}_r$ 很低，当相对密度降低时，$\tilde{\varepsilon}_r$ 趋向于 1。

$$\tilde{\varepsilon}_r=1+(\varepsilon_{r,s}-1)\left(\frac{\tilde{\rho}}{\rho_s}\right) \tag{11.37}$$

式中，$\varepsilon_{r,s}$ 为泡沫实体的介电常数，导电率遵循与导热系数一样的比例准则。

11.6.2 晶格：拉伸主导型结构

既然传统泡沫刚度低的原因是由于元胞壁会发生弯曲的话，那么是否能设计出一种构型使得其元胞边主要受拉呢？这种思考诞生了微桁架晶格结构。为便于理解，我们需要先来了解一个简单但又意义深远的基本定律：麦克斯韦稳定性判据。

式（11.38）是图 11.26 所示由支柱 b 和光滑关节 j 组合而成的铰链框架在二维空间满足静动定体系（即受载时不会折叠起来）的条件。

$$M=b-2j+3=0 \tag{11.38}$$

在三维空间，等效方程为：

$$M=b-3j+6=0 \tag{11.39}$$

如果 $M<0$，该框架是一个机械装置，没有刚度或强度。一旦对其施加载荷，就会发生坍塌。如果将关节锁起来以阻止旋转，一旦受载，组成框架的杆就会发生弯曲，如同图 11.22 的情况。相反，如果 $M \geqslant 0$，该框架不再是一种机械装置。一旦受载，其各组件会承拉或承压（即便在铰接状态下），从而变成拉伸主导型结构。是否锁住关节变得无关紧要，因为对于细长型结构来说，在拉伸状态下的刚度远胜于弯曲状态。由

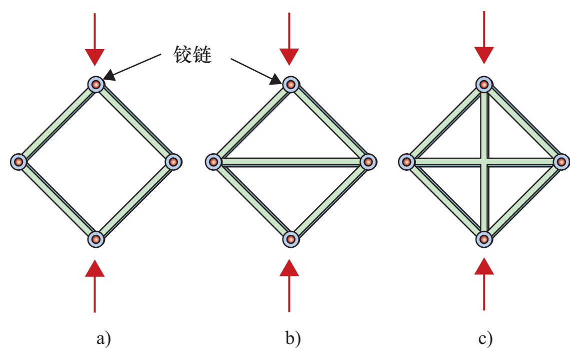


图 11.26　铰链框架

a）铰链框架机械装置（如果将关节焊合在一起，元胞边会发生弯曲变形。）

b）三角形铰链框架在受载时有足够的刚度防止坍塌，因为横向杆可以承拉（将关节焊合在一起，其刚度和强度几乎没有改变。）

c）此框架处于过约束（如果水平杆被拉紧，即便在没有任何外载荷的情况下，竖直杆也会承拉。）

此可以得出一个基本原理：拉伸主导型结构有很高的结构效率，而弯曲主导型结构其结构效率很低。

泡沫性能评估

聚乙烯泡沫的密度 $\rho=150\mathrm{kg/m^3}$。聚乙烯的密度、弹性模量、抗弯强度和导热系数如下表所示。那么相同性能的泡沫会是怎样的情况？

	密度 $\rho_s/(\mathrm{kg/m^3})$	弹性模量 E_s/GPa	抗弯强度 $\sigma_{f,s}/\mathrm{MPa}$	导热系数 $\lambda_s/[(\mathrm{W/m\cdot K})]$
高分子聚乙烯	950	0.94	33	0.195

答：泡沫的相对密度 $\tilde{\rho}/\rho_s=0.16$，利用式(11.29)、式(11.31) 和式(11.36) 可以得到高分子聚乙烯泡沫的弹性模量、抗弯强度以及导热系数见下表。

	弹性模量 $\tilde{E}/\mathrm{GPa}$	抗弯强度 $\tilde{\sigma}_{pl}/\mathrm{MPa}$	导热系数 $\tilde{\lambda}/(\mathrm{W/m\cdot K})$
高分子聚乙烯泡沫	0.024	0.63	0.04

拉伸主导型聚乙烯晶格的密度 $\rho=150\mathrm{kg/m^3}$。聚乙烯的密度、弹性模量、抗弯强度和导热系数都与上例一致。那么晶格的性能会是怎样的呢？

答：晶格的相对密度 $\tilde{\rho}/\rho_s=0.16$。利用式(11.40)、式(11.41)和式(11.36)，可得到如下表所示的高分子聚乙烯晶格的弹性模量、抗弯强度和导热系数。

	弹性模量 $\tilde{E}/\mathrm{GPa}$	抗弯强度 $\tilde{\sigma}/\mathrm{MPa}$	导热系数 $\tilde{\lambda}/[\mathrm{W/(m\cdot K)}]$
高分子聚乙烯晶格	0.05	1.8	0.04

1. 力学性能

上述判据为高效微晶格结构的设计提供了基础。图 11.22 所示的多孔结构，麦

克斯韦常数 $M<0$ 且由弯曲主导；然而图 11.27 所示的结构，$M>0$ 且表现为近似各向同性的拉伸主导型结构。当其受到拉伸载荷时，平均 1/3 的杆承受拉伸载荷。因此，有：

$$\frac{\widetilde{E}}{E_s} \approx \frac{1}{3}\left(\frac{\widetilde{\rho}}{\rho_s}\right)（各向同性,拉伸主导） \tag{11.40}$$

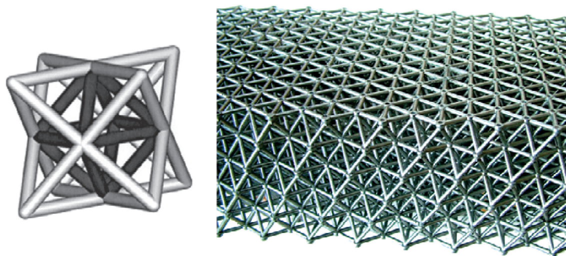


图 11.27 为微桁架结构及其元胞
（它是一种拉伸主导型结构，处于过约束状态，因此可能存在内生应力。）

弹性模量与密度呈线性关系，而非二次关系（见图 11.24b）。当元胞壁屈服时，发生失效。由此，可得出失效应力为：

$$\frac{\widetilde{\sigma}}{\sigma_{f,s}} \approx \frac{1}{3}\left(\frac{\widetilde{\rho}}{\rho_s}\right)（各向同性,拉伸主导） \tag{11.41}$$

这是一个上限值，因为在结构受载时，桁架被假定是在拉应力或压应力下发生屈服。如果支杆很细长，则在发生屈服之前很可能会出现屈曲。类似式(11.32)给出的泡沫的屈曲强度，该结构的屈曲强度为：

$$\frac{\widetilde{\sigma}_{el}}{E_s} \approx 0.2\left(\frac{\widetilde{\rho}}{\rho_s}\right)^2 \tag{11.42}$$

2. 热性能和电性能

尽管弯曲或拉伸的差别对力学性能有着巨大的影响，但是对热性能和电性能的影响微乎其微。这些性能都可以通过前述与泡沫相关的公式计算得到。

3. 多孔结构在性能空间中的填补

第 4 章的所有图中都有一个标记为泡沫的包络区域，对应商业化聚合物泡沫的性能空间。图 11.28 给出了部分弹性模量-密度图，其中对应多孔结构的包络区域做了高亮显示。聚合物泡沫的包络区域沿着斜率为 2 的直线方向有所扩展，与式（11.29）的预测结果相似。相比之下，晶格结构的包络区域沿着斜率为 1 的直线方向有所扩展，与式(11.40)的预测结果一致。在弹性模量 E 与密度 ρ 空间中这两个包络区域内都不含任何固体材料。晶格结构的出现，使得性能空间中对应更高材料指标 $E^{1/2}/\rho$ 和 $E^{1/3}/\rho$ 值的区域得以填补。

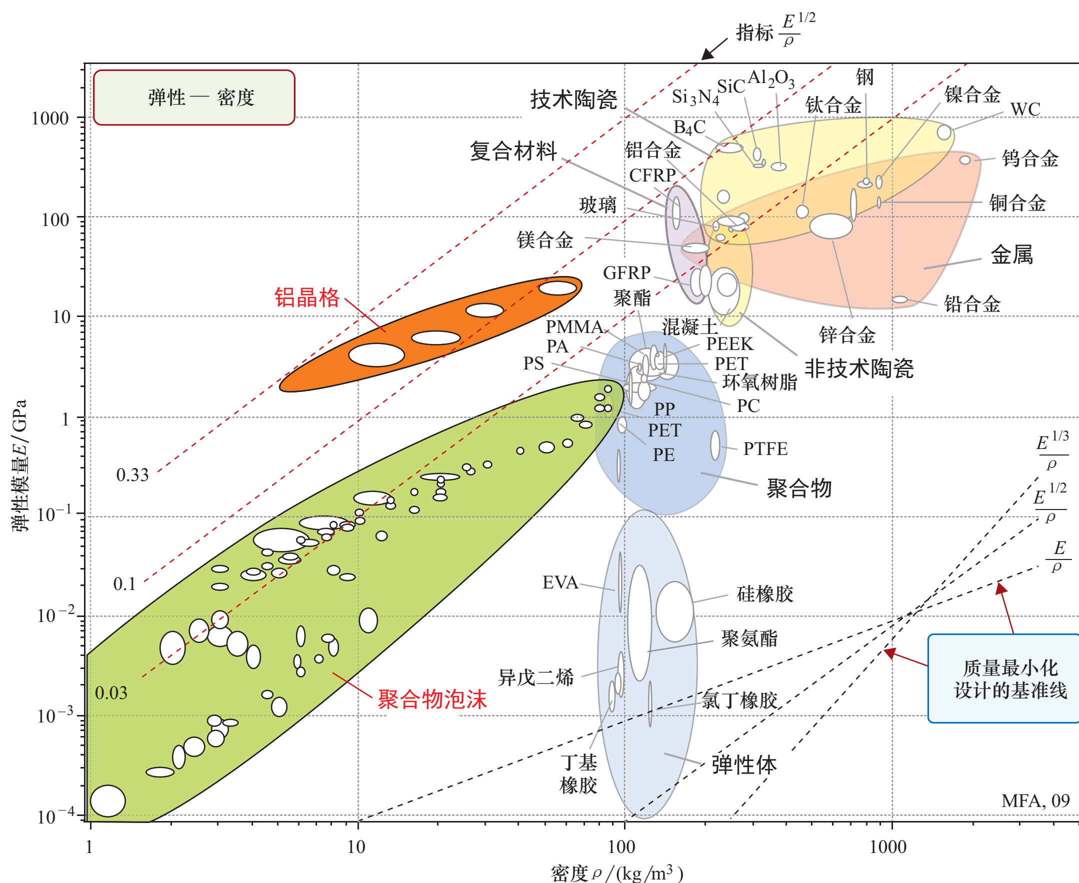


图 11.28 泡沫和微桁架结构都是由材料和空隙组合而成的混合物，其力学性能取决于它们的构型（泡沫是弯曲主导型，其包络线沿着图中斜率为 2 的直线扩展。微桁架结构是拉伸主导型，包络线沿着斜率为 1 的直线扩展。几十年来，二者的包络区域都有了极大的扩展。）

11.7 分段结构

将细分部分作为设计变量。形状的塑造可用于减小弯曲刚度和强度，也能提高它们。弹簧、悬挂、软电缆以及其他柔性结构可以通过塑形获得低的弯曲刚度，同时保持高抗拉强度。这些都是通过将其形状变为股或叶状来实现的，正如第 10 章 10.7 节所描述的那样。当截面承弯时，细长股或叶易发生弯曲而不会被拉长。n 圈线缆比实体参考截面的刚度低 $3/\pi n$，n 片平板的刚度比相应的实体参照平板低 $1/n^2$。

细分可实现混合。如果一部分或多个部分被其他材料替换的话，能够创造出新的材料组合，其性能组合是单一材料所不具备的。下面的例子会详细阐述这种方法。

细分可用于提高损伤容限。玻璃窗被抛射物击中后会粉碎，然而由小块玻璃砖铺设而成的玻璃，即便受到撞击后也不会全部破碎，只会脱落一两块，这就是损伤容限。通过细分或分割材料，裂纹无法在各细分部分间传递，只能发生局部失效，而不是整体失效。这就是所谓的拓扑增韧原理。几千年前建筑工人就应用了相应的原理。虽然

石头和砖块都是脆性材料，但是由它们做成的建筑物，即便没有使用水泥，仍然能抵抗地面运动甚至是小型地震。其原因就在于，它们通过局部失效来避免整体的垮塌。

大跨度电缆材料

悬挂电缆的设计目标是电阻尽可能小，同时使得强度最大化。强度可以保证更大跨度的电缆。这是一个双重优化目标的例子。求解方法如第 7 章中所述，按照惯例分别表述每个目标，然后搜寻其中的最小值。就这样，我们需要搜寻电阻率 ρ_e 以及屈服强度的倒数 $1/\sigma_y$ 最低的材料。

由图 11.29 可知，满足设计要求的最佳材料位于图中左下角。但那个位置有一片空白区域。所有 1700 种金属和合金的性能都在红色虚线上方。那些阻抗很低的材料，如铜、铝及其合金，其强度都不够。而那些强度很高的材料，如冷拉碳钢以及低合金钢，其导电性能又不够好。

现在我们来设想一种电缆，它由铜和钢交叉编织在一起组成，因此每一种材料各占截面积一半。如果钢不承载电流，铜不承受载荷（最悲观的情况），这种电缆的性能位于图中所示位置，其电阻为铜的两倍，强度是钢的一半。它所处的区域之前没有任何其他材料。不同的钢铜比例可以填补性能空间的其他区域。通过调整这个比例，图中阴影包络区域会被填满。类似的铝和钢的混合物将会填补其他区域，正如图中所示的 1000 系列铝合金与 OFHC 铜的各自组合一样。虽然它们的ρ_e和σ_y组合并不是最好的，但是它们更轻、更便宜，因而仍被广泛应用。

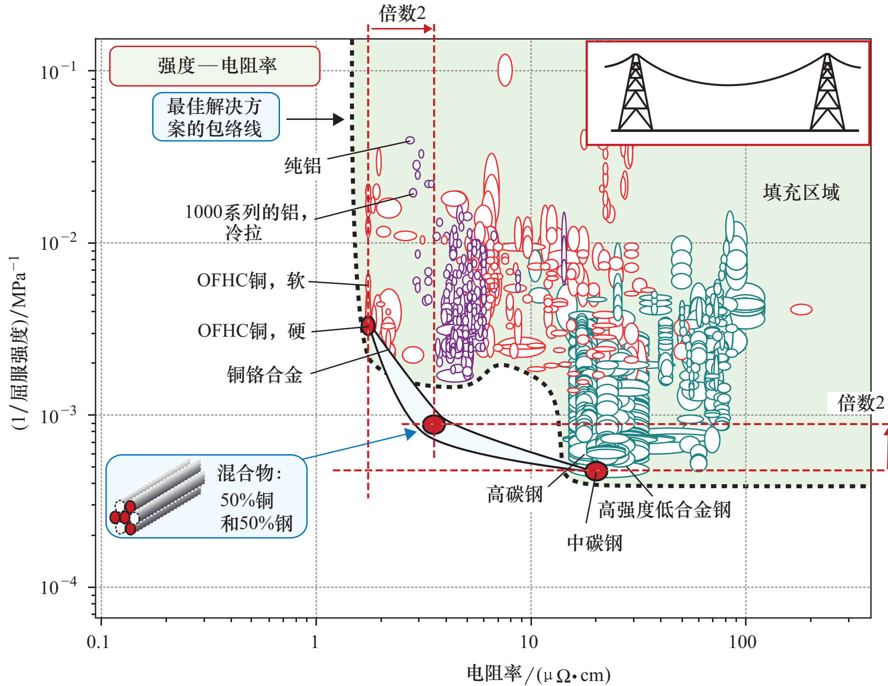


图 11.29 设计一种具有高强度和高电导率的混合物（图中给出了 1700 种金属与合金的电阻以及抗拉强度的倒数。图的构建是针对硬拉拔 OFHC 铜和冷拉拔中碳钢的混合物，但可用于其他混合物的探究。）

简而言之，为获取拓扑损伤容限，结构单元的离散以及单元连锁后的整体承载能力这二者缺一不可。图 11.30a 所示的砖型排样能够承受很大的载荷，且能容忍压缩和剪切损伤，但在拉伸载荷下会瓦解。线状或层状结构能够容忍拉伸损伤，即便其中一缕发生失效，裂纹也不会传递到相邻线串。这也就是多股钢丝绳和电缆所采用的基本原理。图 11.30b 所示的拼图结构，能承受面内拉伸、压缩和剪切载荷，但是会引入应力集中因子$\sqrt{R/r}$，其中 R 为单元的近似半径，r 为单元间锁扣半径。

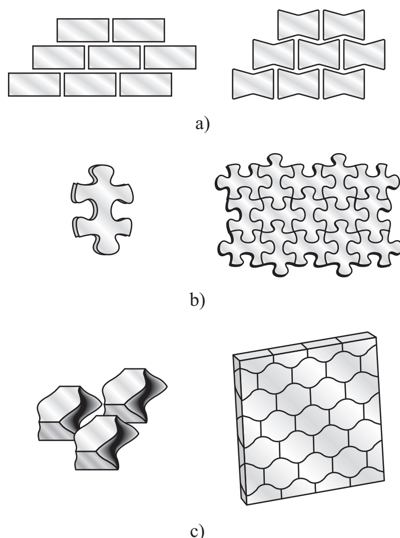


图 11.30　拓扑互锁的例子：能承载的离散非粘接结构

a）矩形块以砖型堆砌能够承载轴向压缩，但是无法承受拉伸和剪切

b）二维内锁拼图能承受平面载荷

c）采用连续层状方式装配并固定在围绕层边的刚性边界内的单元，能承受面外载荷和弯矩

本章 11.9 节所列的资料探索了一系列如图 11.30c 所示的拓扑结构，它们依赖于压应力或刚性边界条件来创建连续层，从而可以承受面外应力和弯矩。这是通过将单元以非平面方式锁在一起，这样既有阵列面内的曲率，也有垂直于阵列面的曲率。倘若阵列面受其边界限制，嵌套形状会限制单元的相对运动，将它们锁在一起。这种类型的拓扑互锁可以形成连续层，并能用于陶瓷覆层和内衬以提供表面保护。当然，其中的单元并不一定是同一种材料。既然唯一的要求是锁扣形状，因此各细分部分可由不同材料组成。正如建筑工人建设砖墙时，既可以利用多孔砖块来通风，也可以用透明材料来保证光照，分段混合物设计师可通过针对单元进行材料选择来实现多种功能。

11.8　本章小结

工程材料的属性可作为多维度性能空间的坐标轴，每一个性能都是一个维度。第 4 章讲解了绘图方法。性能空间图显示有些空间被占满，而有些空间仍是空白。这些空白区域有时可以通过创造混合物来填满，即在特定构型和尺寸下组合两种或以上的材料。设计要求能够筛选出一部分性能空间。如果性能空间已被填满，意味着设计要求能够被满足。然而，一旦选择框在任意一个维度上遇到空白的话，我们就需要混合物

来填补这个区域。如今，我们有许多构型，任意一种都有不同的性能组合。个别构型具有一系列的边界条件，对其有效性能作了归类。本章所提出的方法提供了一种有效的工具来探索不同的材料构型组合。第 12 章将会给出具体的案例。

11.9　扩展阅读

1. 杂化材料（概述）

1） Bendsoe, M. P., & Sigmund, O. (2003). *Topology optimization, theory, methods, and applications*. Springer-Verlag, ISBN 3-540-42992-1.

首次关于构型与尺寸优化相关新兴方法的全面整理。

2） Kromm, F. X., Quenisset, J. M. Harry, R., & Lorriot, T. (2001). An example of multimaterial design. *Proc Euromat'01*. Rimini, Italy.

首次提及杂化设计的论文之一。

3） McDowell, D. L., Allen, J., Mistree, F., Panchal, J., & Choi, H-J (2009). *Integrated design of multiscale materials and products*. Elsevier, ISBN 978-1-85617-662-0.

McDowell 等人将 Olson/Ques Tek LLC 的 “Materials by design approach” 与本书提出的材料选择方法进行了集成，形成了 CES 软件。

2. 复合材料

1） Ashby, M. F. (1993). Criteria for selecting the components of composites. *Acta Mater*. 41, 1313-1335.

关于复合材料性能的模型汇编，对本书中的方法进行介绍。

2） Budiansky, B., & Fleck, N. A. (1993). Compressive failure of fibre composite. *J. Mech. Phys. Solids*, 41, 183-211.

针对复合材料压缩过程中纤维扭结进行了分析。

3） Chamis, C. C. (1987). Engineers guide to composite materials. *Am. Soc. Metals*, pp. 3-24.

关于复合材料性能的模型汇编。

4） Clyne, T. W., & Withers, P. J. (1993). *An introduction to metal matrix composites*. Cambridge Universitv Press, ISBN 0-521-41808-9.

关于金属基复合材料建模的全面介绍，是 Hull 与 Clyne 共同出版一书的姊妹卷。

5） Hull, D., & Clyne, T. W. (1996). *An introduction to composite materials*. Cambridge University Press, ISBN 0-521-38855-4.

关于聚合物基复合材料建模的全面介绍，是 Clyne 与 Withers 共同出版的那本书的姊妹卷。

6） Schoutens, J. E., & Zarate, D. A. (1986). Structural indices in design optimization with metal matrix composites. *Composites*, 17, 188.

关于复合材料性能的模型汇编。

7） Watt, J. P., Davies, G. F., & O'Connell, R. J. (1976). Reviews of geophysics and space, *Physics*, 14, p. 541.

关于复合材料性能的模型汇编。

3. 夹层结构

1） Allen, H. G. (1969). *Analysis and design of structural sandwich panels*. Pergamon Press.

本领域的“圣经”，建立了夹层结构的设计原理。

2） Ashby, M. F., Evans, A. G., Fleck, N. A., Gibson, L. J., Hutchinson, J. W., & Wadley, H. N. G. (2000). *Metal foams: A design guide*. Butterworth-Heinemann, ISBN 0-7506-7219-6.

一本建立了金属泡沫性能的实验与理论基础的书籍，提供了真实泡沫的数据和它们的应用案例。

3）Gill, M. C. (2009). *Simplified sandwich panel design. www. mcgillcorp. com/doorway/pdf/97_Summer. pdf.* Pflug, J., & Verpoest, I. (2006). Sandwich materials selection charts. *Journal of Sandwich Structures and Materials*, 8 (5), 407-421.

4）Pflug, J., Vangrimde, B., & Verpoest, I. (2003). *Material efficiency and cost effectiveness of sandwich materials.* SAMPE US Proceedings.

5）Pflug, J., Verpoest, I., & Vandepitte, D. (2004). SAND. CORE Workshop, Brussels, December.

6）Zenkert, D. (1995), *An introduction to sandwich construction.* Engineering Advisory Services Ltd., Solihull, U. K., Chameleon Press Ltd., ISBN 0-947-81777-8.

夹层结构基础分析的入门书籍。

4. 多孔结构

1）Deshpande, V. S., Ashby, M. F., & Fleck, N. A. (2001). Foam topology: Bending versus stretching dominated architectures. *Acta Mater.*, 49, 1035-1040.

关于弯曲主导拓扑结构和拉伸主导拓扑结构的讨论。

2）Gibson L. J., & Ashby, M. F. (1997). *Cellular solids, structure and properties* (2nd ed.). Cambridge University Press, ISBN 0-521-49560-1.

一本关于泡沫属性、性能和用途的专著，给出了本书 11.6 节中所用公式的推导和实验验证。

3）Gibson, L. J., Ashby, M. F., & Harley, B. (2010). *Cellular bio-materials.* Cambridge University Press, ISBN 9-7805-2119-5447.

自然界中多孔实体的功能分析。

5. 分段结构

1）Dyskin, A. V., Estrin, Y., Kanel-Belov, A. J., & Pasternak, E. (2001). Toughening by fragmentation: How topology helps. *Advanced Engineering Materials*, 3, 885-888.

2）Dyskin, A. V., Estrin, Y., Kanel-Belov, A. J., & Pasternak, E. (2003). Topological interlocking of platonic solids: A way to novel materials and structures. *Phil. Mag.*, 83, 197-203.

上面两篇论文提出了可用于承受弯曲载荷并能提高损伤容限的联锁构型。

3）Autruffe, A., Pelloux, F., Brugger, C., Duval, P., Brechet, Y., & Fivel, M. (2007). Indentation behaviour of interlocked structures made of ice: Influence of the friction coefficient. *Advanced Engineering Materials*, 9 (8), 664-666.

4）Stauffer, D., & Aharony, A. (1994). *Introduction to percolation theory* (2nd ed). Taylor and Francis, ISBN 0-7484-0253-5.

关于渗透理论的介绍，但非常易懂。

5）Weibull, W. (1951). A statistical distribution function of wide applicability. *J. Appl. Mech.*, 18, p. 293.

脆性实体“weakest-link”模型的创造者。

第 12 章

案例分析：混合物



图 12.0　赛艇上遍布混合物（桅杆与下桁：环氧树脂碳纤维；船体：GRFP 和 CFRP，包裹聚甲基丙烯酰胺泡沫夹层板；帆：混织凯夫拉尔尼龙，涂覆热粘合聚酯表层。）

12.1　引言

第 11 章研究了四种类型的混合物：复合材料、夹层板、多孔结构和分段结构。每一种结构都有一系列的模型来评估相应的性能。本章我们将利用这些模型来设计混合物以满足特定需求，这些需求是现有单一材料所无法满足的。为追求最佳性能，复合物被广泛应用于各个领域，图 12.0 就是其中之一：赛艇上几乎遍布混合物。

12.2　金属基复合物设计

施加在结构上的最常见载荷是弯曲载荷。判断设计所用材料优越与否的标准是承

载特定弯矩条件下结构的质量最小化，即指标 $E^{1/2}/\rho$。其中，E 是弹性模量，ρ 是密度。根据这个标准，铝合金和镁合金排名很靠前，钛合金和钢相对来说没那么好。如何进一步加强镁的性能呢？表 12.1 对此需求做了总结。

表 12.1 板材料的设计要求

性能	轻质刚性梁
约束条件	镁基质
目标	比弯曲刚度最大化(指标 $E^{1/2}/\rho$)
自由变量	强化物及其体积分数的选择

1. 方法

图 12.1 显示了金属和纤维的弹性模量-密度图，其中镁合金在红色包络线的最左端。卓越标准对应一系列对角线，其值从右下方到左上方逐渐提高。从图中可以看出，镁比铝稍微好一点，比钛和钢要好得多。

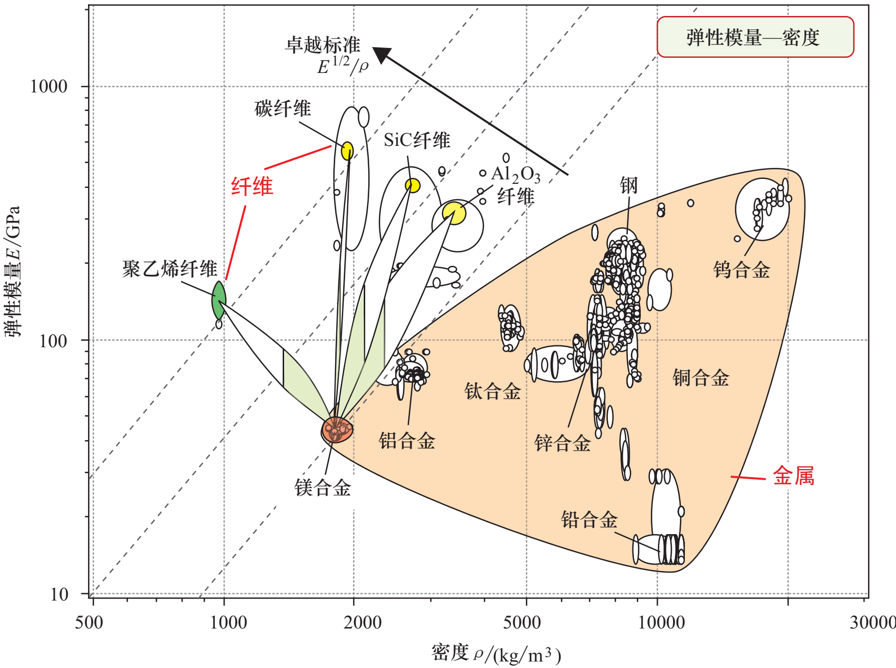


图 12.1 金属和纤维的弹性模量 E 与密度 ρ 的关系图（表 12.2 中的上下界限值构成了图中的菱形区域。绿色阴影部分对应的最大体积分数是 0.5。）

表 12.2 总结了密度和弹性模量的叠加准则。四种铝基复合材料的潜在性能以包络区域的形式绘制在图 12.1 中。包络区域的上边缘代表上界限，下边缘代表下界限。图

表 12.2 复合材料密度和模量的叠加准则[①]

性能	下界限	上界限
密度	$\tilde{\rho}=f\rho_r+(1-f)\rho_m$(精确值)	
弹性模量	$\tilde{E}_L=\dfrac{E_m E_r}{fE_m+(1-f)E_r}$	$\tilde{E}_u=fE_r+(1-f)E_m$

① m 和 r 分别对应基质和强化物；f 表示体积分数。

中我们设定体积分数的上限为 0.5，上限值对应包络区域中的一条竖线，竖线下方阴影部分的包络区域是可获得的混合物。图中的对角线对应卓越标准 $E^{1/2}/\rho$。对应该值越大的材料，比刚度增量也越大。

2. 结果

由图可知，比刚度增量最大的是镁与 PE 纤维或碳纤维组成的复合材料，镁与碳化硅的组合次之，镁与 Al_2O_3 的组合几乎没有任何改善。基于上述方法，我们可以迅速开发替代材料。

3. 附言

镁-PE 复合材料看起来十分有前途，但如何制备这种材料仍有很多困难与挑战。聚合物纤维具有高强度、高刚度以及轻质等特点，因而被广泛用于绳索和电缆中。但当温度超过 120℃时，它们会发生融毁，因此无法采用浇铸或烧结的方式与镁合金复合在一起。一种可能的方法是用拉拔 PE 板代替纤维，将 PE 板粘接在镁板上制成多层板。另一种可能是开发三重复合物。例如，首先将镁粉撒在环氧树脂上，将此混合物作为基质，再与 PE 纤维复合。不然，我们退回至镁—碳复合材料，它也是一个很有吸引力的选择。

相关案例：

见“用于振动台的刚性、高频阻尼材料”（见 6.12 节）。

12.3 软导体和渗流

对于特种设备的可拆卸密封圈材料，它必须能顺应夹紧曲面，且能导电以防止电荷积聚。此外，它应适于模压成型。表 12.3 对这些要求进行总结。

1. 方法和结果

表 12.3 软导体材料的设计需求

功能	软导体
约束条件	弹性模量低，便于构造
	低电阻率（$\rho_e < 1000\mu\Omega \cdot cm$）
目标	可模压成型
自由变量	基质、强化物、构型以及体积分数的选择

金属、碳和一些碳化物以及金属间化合物都是很好的导体，然而它们的刚度很大且不易变形（见图 12.2）。热塑性和热固性弹性体都能变形且十分柔软，但是它们不能导电。如何来复合这些材料呢？如果产品在保护环境下使用，金属表面涂覆聚合物的方法是可行的，但是镀层容易被破坏。如果要求产品坚固且柔韧，则体积传导相对于面传导更为重要。这可以通过在聚合物内加入导体材料来实现。但是，加入的量多少合适？以何种形态？

想象一下，以震动方式将容器内相同尺寸的导电球体与绝缘球体混合在一起。如果只有很小一部分导电球体，且它们之间不接触，就会导致整个阵列是绝缘体。如果每一个导电球体只与另外一个导电球体接触的话，整个阵列仍然没有导电路径。即便每个导电球体平均接触另外两个导电球体，仍然没有导电路径。导电球体越多，其团簇越大，但即便如此仍是离散的。对于体积传导来说，连通性是首要的。当导电球体的体积分数 f 达到渗流阈值 f_c 时，不同面之间由一系列接触点串接在一起，阵列就成为导体。渗流问题很容易描述，但是很难解决。自 1960 年以来，有关这方面的研究给出

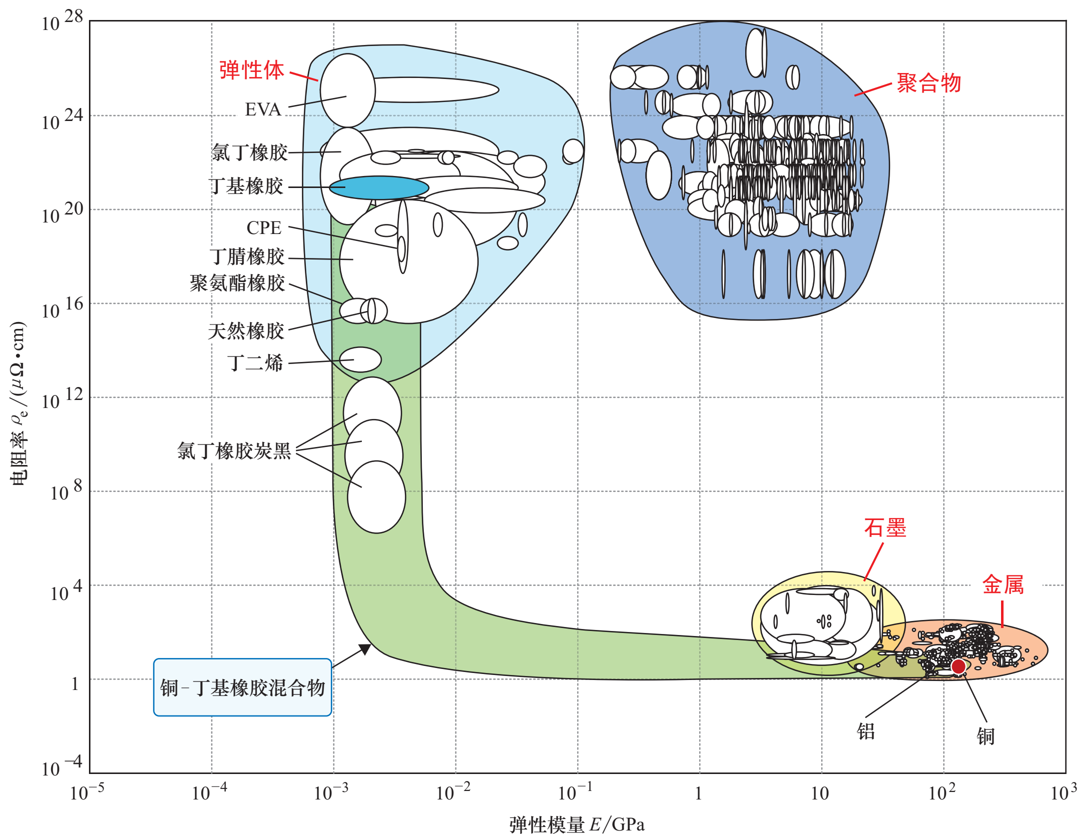


图 12.2 当导电颗粒或纤维与绝缘弹性体复合在一起时，材料—性能空间就会有一个空白区域被填满（碳填充丁基橡胶位于该区域内。）

了绝大多数与混合物设计相关的渗流问题的近似解（可查阅“扩展阅读”）。对于简单的密排立方结构，渗流阈值 $f_c=0.248$；对于密堆积结构，渗流阈值 $f_c=0.180$。对于随机阵列，渗流阈值在二者之间，约为 0.2。

采用更小的球体会使得转变过程不那么清晰。虽然渗流阈值仍是 0.2，但是第一条连接路径会变得很细小且迂回，是众多实际已连接路径中唯一一条实际联通的路径。体积分数的提高有助于连接路径数量的增加，两者的关系从一开始的 $(f-f_c)^2$ 关系慢慢演变为线性关系，之后符合混合规则关系。如果颗粒物非常小，体积分数为 0.4 时才能有良好的导电性。但是这样的话，会严重降低聚合物的可塑性和柔韧性。

合适的形状可以改善这个问题。如果以细长纤维代替球体，它们之间的接触将会容易很多，渗流阈值也会降低。根据经验，如果它们的纵横比 $\beta=L/d$（其中 L 是纤维长度，d 是纤维直径），渗流阈值会由 f_c 降到 $f_c/\beta^{1/2}$。因此，当纵横比 $\beta=9$ 时，导电相的体积分数 P_c 会减少三倍。

渗流概念是混合物设计的一个必要手段。电导率是这样，通过泡沫或多孔材料的流体通道也是如此。没有连通路径，没有流体流动，百万种可能中仅有一处存在泄漏。若增加连接，则会形成洪水。渗流理论对于理解混合物的输运性质至关重要。输运能力决定电、热以及液体的流动，或流体的扩散，尤其是混合物组成分之间的性能差异

极大时，这种决定作用更显著，因为连接路径开始起作用。

图 12.2 是金属、聚合物以及复合材料的电阻率-弹性模量图。在图的左下角有一片空白，而我们所需要的性能组合可能就在这个区域。浅绿色的 L 形包络区域内包含由橡胶和碎铜线组成的混合物的性能。对于金属丝，电阻率在渗流阈值附近急剧下降至几个百分点。相应的材料保留了弹性体的所有柔韧性，但已成为一个体积导体。

2. 附言

应用这种思想的导电弹性体正被广泛应用。这样的材料可用于防静电服装和垫子，可用作压力传感元件，甚至无焊连接。

相关案例：

见“热传导与电传导的极端组合”（见 12.4 节）。

12.4 热传导与电传导的极端组合

导电性很好的材料，往往其传热性能也很好，比如铜。相对而言，大部分聚合物都是电绝缘体（意味着它们的电导率很低，以至于实际应用中根本不导电），而且作为固体，其传热性能也很差，比如聚乙烯。因此对于单一材料来说，其导电性能和传热性能往往是高-高或低-低组合。高-低或者低-高组合是另外一种情况，大自然中都鲜有发现。那么如何仅用铜和聚乙烯设计出满足上述两种组合性能的混合物？表 12.4 总结了所面临的挑战。铜和聚乙烯的数据见表 12.5。

表 12.4 铜和聚乙烯混合导电材料的设计需求

功能	热传导和电传导的极端组合
约束条件	材料：铜和聚乙烯
目标	最大化导电性能和传热性能的差异
构型	自由选择
自由变量	两种材料的构型和相对体积分数

表 12.5 铜和聚乙烯的数据

材料	电导率/(1/μΩ·cm)	导热系数/(W/m·K)
高导电性铜	0.6	395
高密度聚乙烯	1×10^{-25}	0.16

1. 方法和结果

图 12.3 显示了两种可能的混合物构型。虽然都是复合物类型，但是其构型和体积分数有很大的差异。第一种构型是混乱的细铜线嵌入 PE 基质。我们借助第 11 章 11.4 节提到的界限来描述其性能。正如 12.3 节所解释的那样，导电性需要渗流，通过使用高纵横比的导线可以有效降低渗流阈值。在达到渗流阈值前，导电性满足混合规则（参考式(11.9)，将导热系数改为电导率即可）：

$$\tilde{k}_1 = fk_{Cu} + (1-f)\,k_{PE} \tag{12.1}$$

对于图 12.3 中的无规则阵列，其导热系数接近于下界限值（见式(11.10)）：

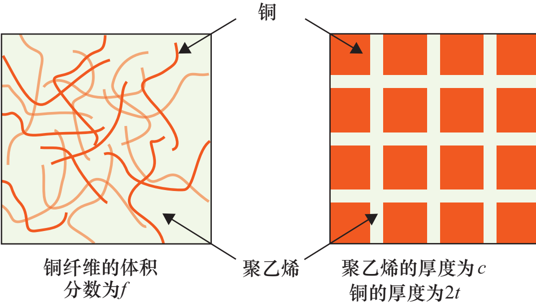


图 12.3 铜和聚乙烯的两种构型（这里给出的是二维结构，很容易扩展至三维。左侧的复合物有很高的导电性能，但是传热性能很差；右侧的复合物则刚好相反。）

$$\widetilde{\lambda}_1 = \lambda_{PE}\left(\frac{\lambda_{Cu}+2\lambda_{PE}-2f(\lambda_{PE}-\lambda_{Cu})}{\lambda_{Cu}+2\lambda_{PE}+f(\lambda_{PE}-\lambda_{Cu})}\right) \tag{12.2}$$

图 12.4 给出了这类复合材料的性能$\widetilde{k}_1$ 和$\widetilde{\lambda}_1$ 分布，逐步增加体积分数 f，可得到它们的上限制曲线。

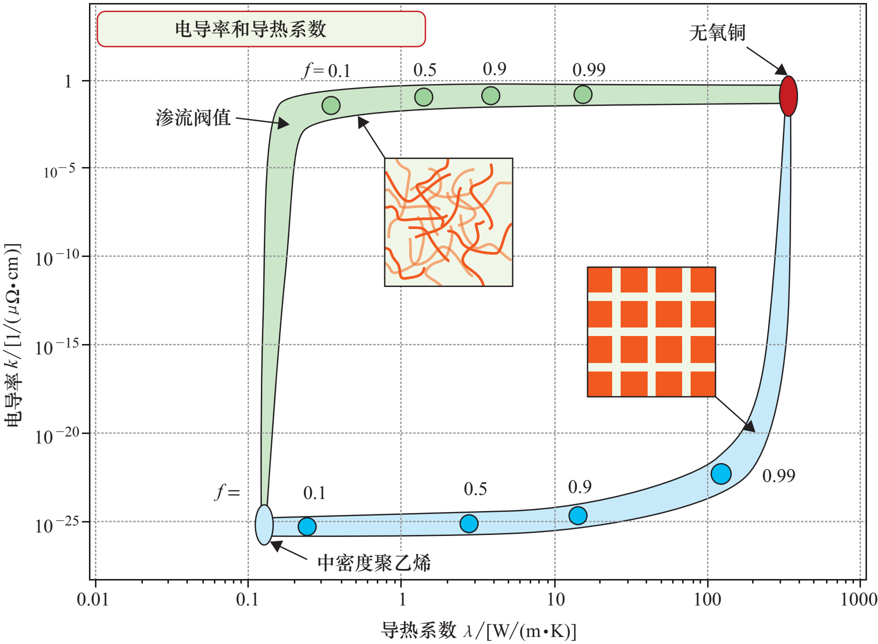


图 12.4 两种铜与聚乙烯的混合物构型能获得的传热和导电性能组合差异巨大，创造出来的新材料的性能是匀质材料所不具备的

第二种混合物为多层复合材料，它由三簇正交的 PE 平板将铜块分割开来。再次利用第 11 章 11.4 节的界限方法。当 PE 层很薄时，厚向热阻会增加，且电阻也会增加。这意味着其电导率和热导系数可由调和平均值（式(11.24)）给出：

$$\widetilde{k}_2 = \left(\frac{f}{k_{Cu}}+\frac{(1-f)}{k_{PE}}\right)^{-1} \tag{12.3}$$

$$\widetilde{\lambda}_2=\left(\frac{f}{\lambda_{\mathrm{Cu}}}+\frac{(1-f)}{\lambda_{\mathrm{PE}}}\right)^{-1} \tag{12.4}$$

图 12.4 给出了这种复合材料的性能$\widetilde{k}_2$ 和$\widetilde{\lambda}_2$ 分布，并给出了其下限曲线。两种性能值的范围差异导致了曲线形状的不同。其中，导热系数 λ 相差 1000 倍，电导率 κ 相差 10^{25} 倍。两种混合物的性能也有显著不同。可见，杂化可创造出性能组合极端的材料。

2. 附言

第一种类型的混合物被广泛用于电脑和电视机柜，以实现电屏蔽。相对而言，第二种类型要少见一些，可用作电子设备的散热片。在这类电子设备中大规模电传导会导致电耦合和涡流损耗。但是如何制备第二种类型的混合物呢？或许可以这样，将一堆铜板和聚乙烯薄膜交错热粘接在一起，沿垂直于层叠方向将铜板堆切开，然后将这些切片与聚乙烯薄膜重新交错堆叠，最后又一次切割和堆叠以得到最终的层集。

相关案例：

见“换热器材料”（见 6.17 节）、“软导体和渗流”（见 12.3 节）、“握力不会减小的连接器”（见 12.7 节）。

12.5 冰箱内壁

图 12.5 所示的冰箱或冰柜的平板有两项基本功能。其一是绝缘。为此，材料厚度方向的导热系数应尽可能小。其二是面向机械的功能。冰箱内壁必须有足够的强度和刚度，能为置物架提供支撑。对于给定厚度的平板，第一项功能可以通过最小化近似导热系数$\widetilde{\lambda}$来实现。第二项功能可以通过搜寻弯曲模量$\widetilde{E}_{flex}$最大化的材料或混合物来实现。（详见表 12.6）



图 12.5 冰箱（内壁所用平板必须绝热，避免外部环境的影响。同时，它需有足够的刚度和强度以避免弯曲变形。）

表 12.6 绝缘平板材料的设计需求

功能	绝缘平板
约束条件	足够的刚度以抑制振动和内部负荷支撑
	低成本
	环保
	不要太厚
目标	厚度方向的导热系数最小
自由变量	面板和芯部的材料及其相对厚度

1. 方法和结果

这里我们选用夹层结构的混合物，探索各种面板与芯部材料组合之间的性能差异，以及与单一材料的性能差异。弯曲模量$\widetilde{E}_{flex}$可由式（11.18）计算得到，导热系数$\widetilde{\lambda}$可由式（11.24）计算得到。表12.7对上述方程做了归纳，其中t是面板厚度，d是平板厚度，E_f是面板的模量，λ_f和λ_c分别是面板和芯部的导热系数。K_s是发生芯部剪切的临界因子，在未发生剪切时数值为1，通常是0.5。

表12.7 夹层结构的刚度和导热性能的叠加准则

性 能	下界限	上界限
弯曲模量	$\widetilde{E}_{flex}=\left(1-\left(1-\frac{2t}{d}\right)^3\right)E_f K_s$	$\widetilde{E}_{flex}=\left(1-\left(1-\frac{2t}{d}\right)^3\right)E_f$
厚度方向的导热系数	$\widetilde{\lambda}_{\perp}=\left(\frac{2t/d}{\lambda_f}+\frac{(1-2t/d)}{\lambda_c}\right)^{-1}$（精确值）	

图12.6给出了导热系数$\widetilde{\lambda}_{\perp}$和弯曲柔度$1/\widetilde{E}_{flex}$的性能图表，之所采用弯曲柔度而不是弯曲刚度，是为了搜寻最小值的目的。图中绘制了由低碳钢面板和刚性发泡PVC芯部组成的夹层结构的近似性能，其值由表12.7中的方程计算得到，分别对应四种面板体积分数。蓝色带状区域包含了其他所有的性能组合。上述平板所提供的刚度以及绝热性能组合是单一金属材料、复合材料、聚合物以及泡沫所无法提供的。其他面芯组合（如铝板或SMC面板结合聚苯乙烯泡沫芯部）也可利用上图快速评估其性能，但是任何其他组合的性能都无法匹敌钢-聚苯乙烯组合。

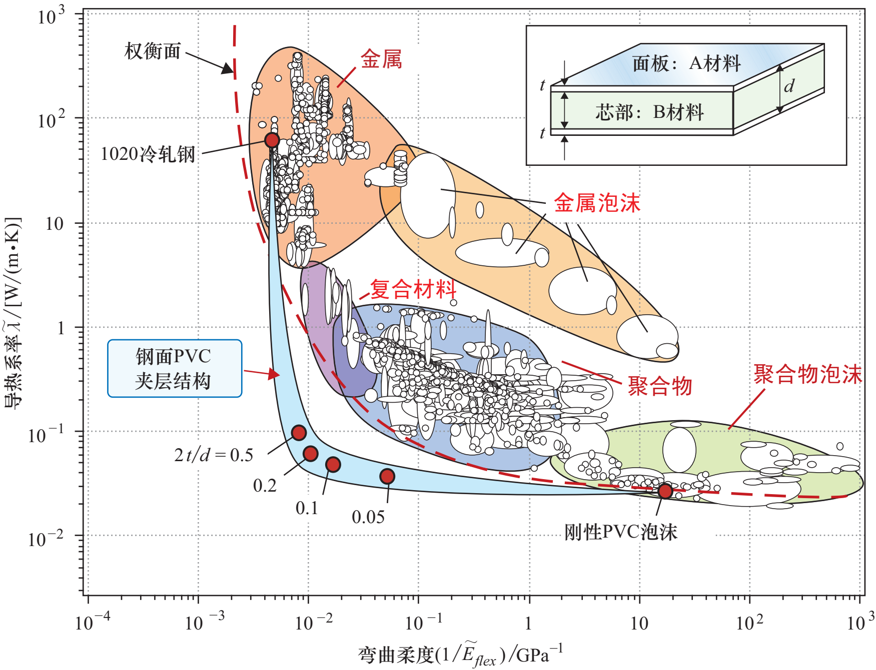


图12.6 蓝色L形轨迹区域是钢面PVC泡沫芯部夹层结构的性能图
（热传导性能对应纵轴，力学性能对应横轴，两者都要尽可能最小化。）

2. 附言

近 20 年来，粘结剂技术得到了飞速发展。现在几乎任意两种材料都可以被粘接，且有很高的粘接强度，尽管一些粘结剂十分昂贵。因此，制备夹层板不再是个问题。

相关案例：

见“节能炉壁”（见 6.14 节）、“微波透射屏蔽罩材料”（见 12.6 节）。

12.6 微波透射屏蔽罩材料

在第 6 章 6.19 节我们介绍过微波透射屏蔽罩，它是一块薄平板或壳体，要求尽可能高的弯曲刚度和强度，且要求介电常数 ε_r 尽可能小。相对于单一材料，混合物能否提供更优的性能？

1. 方法和结果

夹层结构能够提供足够的弯曲刚度和强度，并能控制其电性能。因此，我们从这个方向着手，尝试找到满足表 12.8 要求的材料。

表 12.8 低介电常数屏蔽罩材料的设计需求

功能	微波屏蔽罩材料
约束条件	满足抗弯强度 σ_{flex} 的约束
目标	最小化介电常数 ε_r
自由变量	面板材料和芯部材料的选择
	两种材料的相对厚度

图 12.7 给出了抗弯强度 $\widetilde{\sigma}_{flex3}$-介电常数 ε_r 的性能图，表中标识了泡沫、聚合物以及陶瓷的相关性能数据。很多聚合物的介电常数介于 2～5 之间。如果这些聚合物由发泡制成，则介电响应是一种扩展性能。泡沫的介电常数与相对密度呈线性下降关系，在密度很低时接近于 1（式 11.37）。

$$\widetilde{\varepsilon}=1+(\varepsilon_{r,s}-1)\left(\frac{\widetilde{\rho}}{\rho_s}\right) \tag{12.5}$$

式中，$\varepsilon_{r,s}$ 是泡沫实体的介电常数，$\widetilde{\rho}/\rho_s$ 是相对密度。然而，泡沫的强度不够。相比而言，CFRP 的介电常数是 5，但强度更高。通过对图 12.7 中可能存在的面芯组合材料的细致观察，我们选择以 CFRP 为面板，以中/低密度聚合物泡沫为芯部的夹层结构作进一步的探索。倘若制备工艺良好且芯部材料有足够的强度，这种夹层板的抗弯强度可由下式计算得到。

$$(\widetilde{\sigma}_{flex})_U=(1-(1-f)^2)\sigma_f+(1-f)^2\sigma_c \tag{12.6}$$

平板的介电常数可由下式给出：

$$\widetilde{\varepsilon}_r=f\varepsilon_f+(1-f)\varepsilon_c \tag{12.7}$$

研究夹层板介电常数的最简单方式，就是在介电常数-抗弯强度图中绘出上述两种材料的性能组合，再以 $f=2t/d$ 作为参数计算不同面板体积分数对应的性能数据，借此将它们连接在一起。由图 12.7 可知，夹层板能够创造出一系列的材料，其抗弯强度与

介电常数的性能组合超越图中所有的匀质材料，甚至还优于最好的复合材料（图中未予显示）。利用图，我们可以根据想要的抗弯强度 σ_{flex}，从图中读出夹层板对应的 f 值以及介电常数。

相关阅读：

1）Huddleston，G. K.，& Bassett，H. L.（1984）. Radomes. In R. C. Johnson，& H. Jasik（Eds.）. *Antenna engineering handbook*（2nd ed.），chapter 44. McGraw-Hill，ISBN 0071475745.

2）Lewis，C. F.（1998）. Materials keep a low profile. *Mechanical Engineer*（June），37-41.

相关案例：

见“雷达天线罩材料”（见 6.19）。

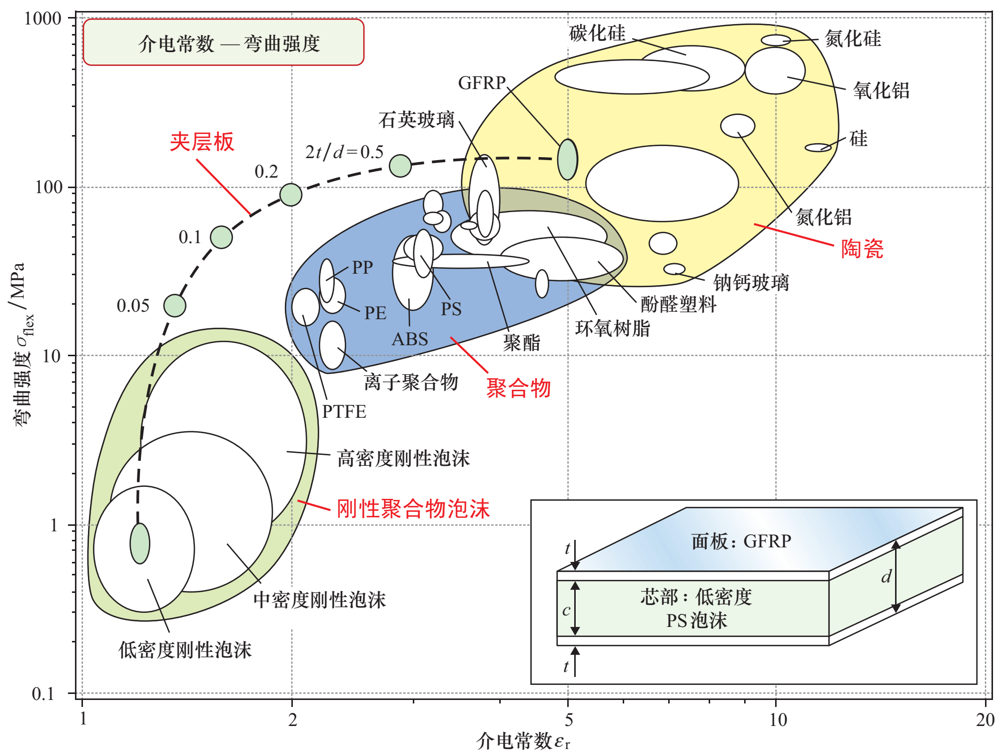


图 12.7 材料的抗弯强度-介电常数性能图

（轨迹线对应 GFRP 与聚合物泡沫组成的夹层板的潜在性能。）

12.7 握力不会减小的连接器

在一辆汽车中约有上千米长的电线，随着电动控制驾驶系统的出现，这个长度会进一步增加。只有当电线末端与某些物件连接起来后，电线才会起作用。因此，连接器需加以关注。随着时间的推移，连接器会不断松动。最后，连接器会脱落。

如今，汽车制造商根据市场需求，将汽车的使用寿命一般设计为至少 30000km 且平均使用周期为十年。此外，在汽车的整个使用周期中电路系统不需要维修保养。因

此，电路系统的完整性很重要。你不会希望电动车上的连接器出现松动。随着发动机和尾气排放系统的不断仪器化，很多连接器会变热，其中还有一些要求能在 200℃ 高温中保持良好的导电接触（见表 12.9）。

表 12.9 连接器材料的设计需求

功能	电连接器混合导体
约束条件	良好的导电性
	在车辆生命周期内，200℃ 时能维持夹紧力
目标	最小化成本
自由变量	材料 1 和材料 2 及其相对厚度

现在的连接器的主要材料是铜–铍合金，含 2% 铍（质量分数）。这种材料具有非常优异的导电性能，同时具有很高的强度，可以像弹簧一样工作以确保连接器有足够的夹紧力。但是铜-铍合金的最高长时间工作温度只有约 130℃；在更高的温度下，蠕变松弛会导致连接器松动。因此，如何解决这个问题是我们所面临的一个挑战。

1. 方法和结果

解决方案是，针对上述功能分别找出最佳的材料，检查它们之间的兼容性并组成混合物。具体执行过程如下。功能一：导电性能。在现有材料中，铜的导电性最好。虽然铜合金（比如铜-铍合金）的强度更好，但是会损失一部分导电性能，且成本急剧增加，因此我们选择铜作为导体。功能二：在汽车整个生命周期中提供夹紧力。针对功能二所选择的材料必须粘接在铜上，如果要求这个组合即使在受热情况下也不会发生扭曲，那么它们必须有相同的热膨胀系数。

图 12.8 和图 12.9 将帮助我们做出选择。第一张图给出了铜、Cu-2% Be 和一些钢

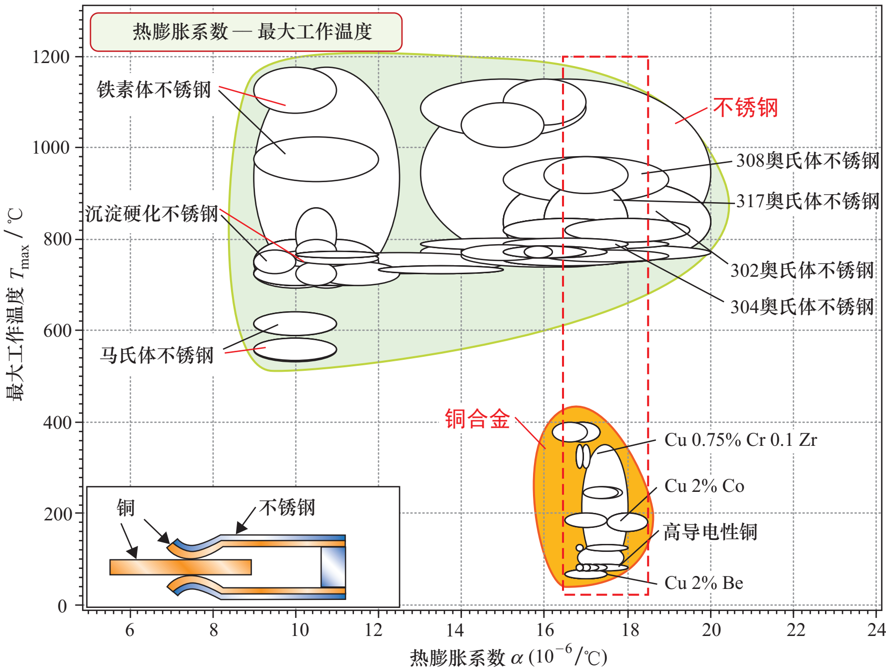


图 12.8 混合物连接器（需要寻找热膨胀系数相匹配的材料，其中之一还要保证在 200℃ 以上保持足够的强度和刚度。铜由于其卓越的导电性能而被选为第一种材料，302 不锈钢和 304 不锈钢是材料 2 的不二选择。）

的最大工作温度与热膨胀系数的性能组合。选择框内的材料与铜的热膨胀系数一样。302 不锈钢和 304 不锈钢就在此列，但其可用于更高的温度环境。但是，它们能制成好的弹簧吗？价格能否被接受？图 12.9 回答了这些问题。好的弹簧材料（第 6 章 6.7 节）都有很高的 σ_f^2/E 值，该变量对应图 12.9 的纵轴。图 12.9 的横轴为近似价格。由图可知，锻造态下的 302 不锈钢和 304 不锈钢作为弹簧的性能堪比铜-铍合金，而且价格更为便宜。

2. 附言

最终建议的解决方案是铜与 302 不锈钢的混合物，可通过图中插图所示的叠轧连接工艺进行材料制备。进一步的详细设计包括确定每一层的厚度、最佳冷变形程度、成形性以及对工作环境的各种抗性。但是，上述方法已快速、高效地将我们引入正确轨道。

相关案例：

见“弹簧材料”（见 6.7 节。）、“超高效弹簧”（见 10.8 节）。

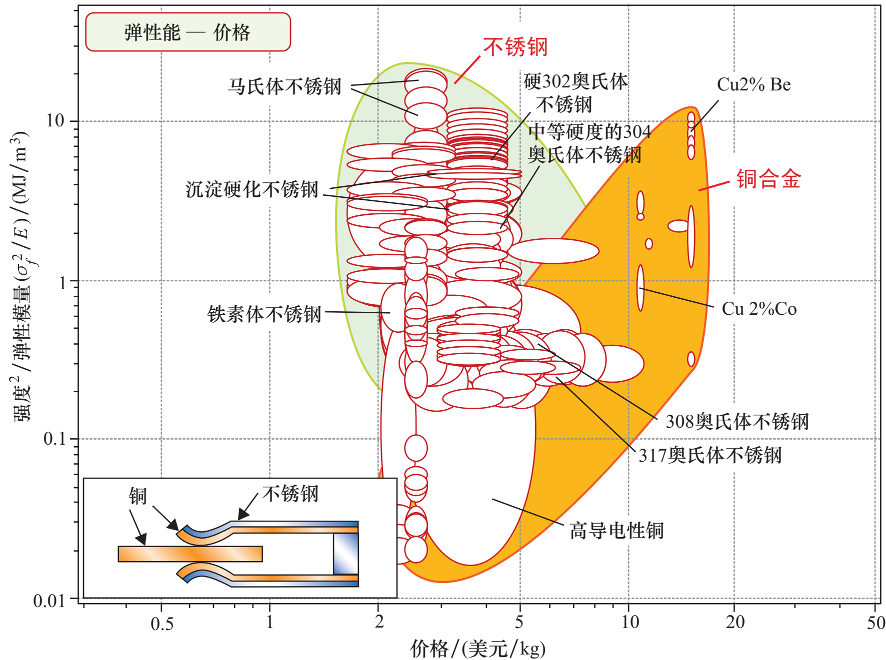


图 12.9 连接器有两项功能：导电和施加夹紧力以确保不松弛（高导电性的铜和 304 不锈钢都比铜-铍合金便宜，将它们叠轧连接在一起无疑会增加成本，但在大批量生产条件下会有竞争力，并且它解决了松弛问题。）

12.8 各向异性的应用：散热面

由单一材料制成的炖锅在明火下加热时，能够产生热点并能在热点下烘烤食物。这是因为炖锅壁很薄，热量在厚度方向的传递快于横向传递。横向传递会使得整个锅面处于同一温度。常用于炖锅的金属材料有铸铁、铝合金、不锈钢和铜。这些材料的导热性能都是各向同性的。本例中，我们要寻找的材料需满足横向导热系数大于厚向导热系数。双层（或多层）混合物能够实现这一点。表 12.10 对需求做了总结。

表 12.10　平板的设计需求

功能	散热面
约束条件	温度达到 200℃ 时不发生扭曲
目标	保持良好导电性的同时，最大化热各向异性
自由变量	材料及其相对厚度的选择

1. 方法和结果

双层结构的面内热传导有两条平行路径，总热流量是所有路径的热流量之和。如果其中一层为材料 1，厚度为 t_1，导热系数为 λ_1，另外一层为材料 2，厚度为 t_2，导热系数为 λ_2，二者粘接在一起后平行于层方向的导热系数为：

$$\widetilde{\lambda}_{//}=f\lambda_1+(1-f)\lambda_2 \tag{12.8}$$

式中，$f=t_1/(t_1+t_2)$。垂直于层方向的导热系数为：

$$\widetilde{\lambda}_{\perp}=\left(\frac{f}{\lambda_1}+\frac{(1-f)}{\lambda_2}\right)^{-1} \tag{12.9}$$

如果双层结构组成材料的热膨胀系数差异很大，加热后锅会变形。因此我们需要一对热膨胀系数尽量一致的材料，但是导电性能差异尽量大，以最大化式（12.8）和式（12.9）的差异。

2. 附言

铜是一种优秀的热导体。在 12.7 节的案例中我们发现，热膨胀系数与铜相匹配的材料有 302 不锈钢和 304 不锈钢。然而，这两种材料的导热性能有一定差异。图 12.10 给出了由铜和奥氏体不锈钢组成的双层结构，相对于面板体积分数 f 的厚度方向导热系数 $\widetilde{\lambda}_{\perp}$ 以及横向导热系数 $\widetilde{\lambda}_{//}$ 的变化趋势。由图可以看出，$\widetilde{\lambda}_{//}$ 和 $\widetilde{\lambda}_{\perp}$ 的最大差异出现在 $f=0.5$ 的时候。此时，两种材料的导热系数比值（各向异性比）为 6.7。混合物沿着热各向异性的维度扩展了原有的性能空间。

相关案例：

见“被动式太阳能供暖装置用材料”（见 6.15 节）、“握力不会减少的连接器”（见 12.7 节）。

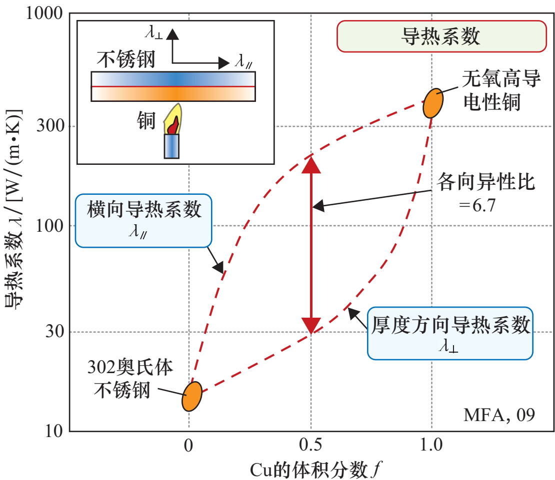


图 12.10　创造各向异性（铜和不锈钢合成的双层材料具有很好的导热性，其各向异性比大于 6。）

12.9 天然材料的机械效率

自然选择作为一项基本准则一直在尝试精简组织结构的每一个部分。

——查尔斯 达尔文，写于 150 年前。

天然材料是相当高效的，之所以说其高效是因为它们满足了植物和动物的各种复杂要求，且用料非常少。很多要求都涉及自然界中的机械问题，如支撑由生物体重量或风荷载引起的静态或者动态载荷；存储和释放弹性能；大角度弯曲以及抵抗屈曲和断裂。

事实上几乎所有的天然材料都是混合物，包括小部分聚合物、陶瓷部件或建筑材料，其中建筑材料通常情况下是复合材料。例如植物细胞壁，它是由纤维素、半纤维素和胶质组成，可以木质化；动物组织大多数由胶原蛋白、弹性蛋白、角蛋白、甲壳质以及钙盐或硅盐等矿物质组成。由此可以看出，自然界构造了相当大范围的结构混合物。木材、竹子和棕榈都是以木质素或半胶质为基质，内含纤维素纤维作为强化物，形成不同壁厚的中空棱形单元。头发、指甲、角、爬行类动物和陆地动物都由角蛋白组成，而昆虫的角质层则是以蛋白质为基质，内含甲壳质。软体壳类的主要成分为碳酸钙，与一小部分蛋白质粘接在一起。象牙质、骨头和鹿茸则是由羟磷灰石和胶原蛋白制成。胶原蛋白是动物软体和硬体组织的基本结构单元，如肌腱、韧带、皮肤、血管、肌肉和软骨，通常被制成不同的形状。

从力学观点看来，单一建筑砖块没有任何独到之处。纤维素纤维的弹性模量与尼龙鱼线的弹性模量一样，远小于钢的弹性模量。然而，将它们嵌入木质素-半胶质基质中组成的混合物的性能接近环氧树脂。羟磷灰石的断裂韧度与人造陶瓷相当，意味着它是易脆材料。由此可见，组成分的构型促成了天然材料的出众效率。

图 12.11 和图 12.12 分别给出了木头和骨头的复杂构型层次。木头的刚度、强度和韧度大多来自于纤维素颗粒，如图 12.11 左图所示。晶体微纤维是由沿长度方向间隔 30～60nm 整齐排列的微小颗粒组成。这样可在非晶木质素和半纤维素组成的基质中形成片层状加强纤维。以四层模式沿纤维取向构建的叠层体可作为细胞壁的结构材料（见图 12.11 右图）。基础细胞壁的原纤维随机交织在一起，如同棉絮一样。在随后的层中，原纤维平行密堆在一起。外侧的 S1 层由交替的原纤维左右螺旋绕组和片晶组成；在其里面是 S2 层，它几乎由沿着细胞轴向的原纤维组成；最里面是 S3 层，它几

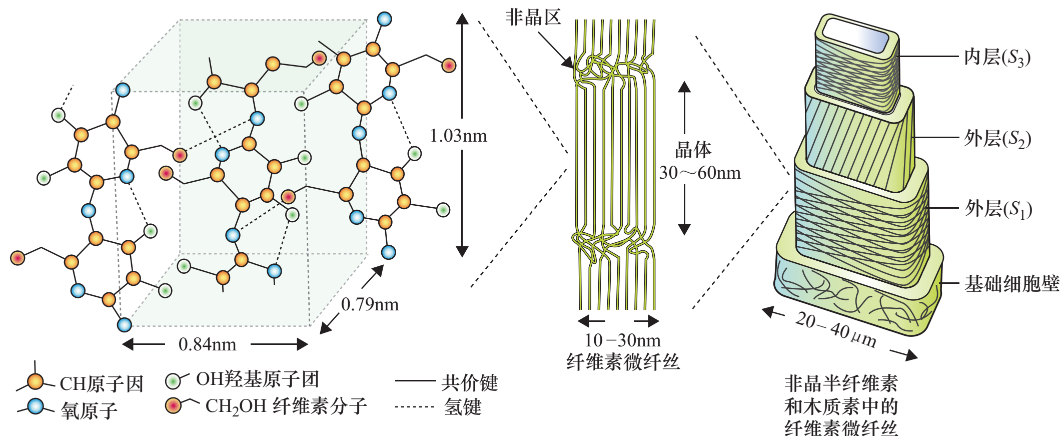


图 12.11 木头的层次结构

乎与 S1 层一样。细胞作为整体与其相邻细胞通过中间片晶粘接在一起。片晶是一种缺乏纤维素的木质素-胶质混合物。

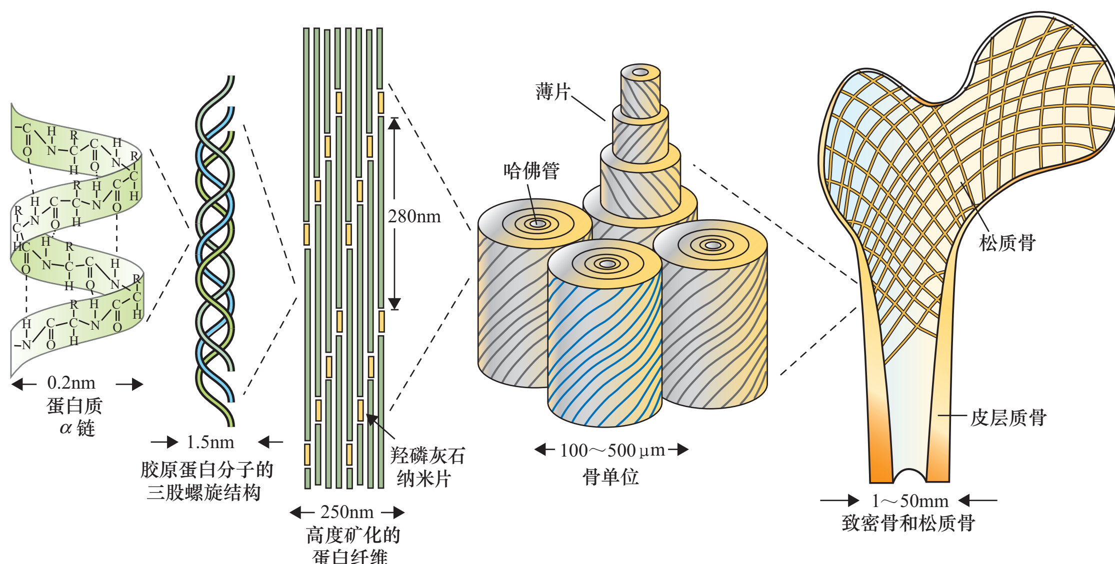


图 12.12 骨头的层次结构

尽管骨头和木头在分子化学方面存在巨大的差异，但是它们的层次结构却有着很多相似之处（见图 12.12）。基点是胶原蛋白分子的三股螺旋结构（见图 12.12 左图）。但是与木头不一样，这种结构是基质，而非骨矿化组织的加强物。羟磷灰石纳米片被存储于分生组织中，并随着时间的推移体积分数不断增加，从而生成成熟的骨单位，结合有序排列的有足够强度和刚度的高度矿化的纤维，以支撑结构载荷。这些载荷是成熟有机体的骨头所必须承载的。在宏观尺度上，致密骨构成完整骨头的外部结构，而多孔松质骨填充脊椎、壳状骨头（如头盖骨）和长骨末梢（如股骨）。

与工程材料一样，天然材料也可以分为多个类别：生物陶瓷（方解石、霰石和羟磷灰石）、生物聚合物（有机部分：多糖、纤维素、蛋白质、甲壳质、胶原蛋白、丝和角蛋白）以及天然弹性体（弹性蛋白、节肢弹性蛋白、外展素、皮肤、动脉和软骨）。将它们组合在一起可形成一系列混合物，包括复合材料与夹层结构（骨头、鹿角、釉质、象牙质、贝壳、章鱼和珊瑚）、多孔结构（天然多孔材料，如木材、软木、棕榈、竹子和松质骨），以及分段结构（鱼鳞和毛发）。它们的性能可以就像工程材料那样，利用材料性能图表来加以研究和比较。接下来，我们利用性能图来检验天然混合物与它们组成分材料的性能差异。

1. 弹性模量—密度图

图 12.13 是弹性模量与密度构成的性能图。图中大的包络区域对应天然材料，中间的小气泡代表类成员。木材、棕榈、软木、泡沫状松质骨和珊瑚等的数据都在下属的包络区域内。天然纤维（丝、亚麻以及黄麻等类似纤维）都有属于自己的包络区域，矿化组织（骨头、贝壳等）以及软组织（韧带、软骨等）也是一样。图中分别标注了平行于纤维方向或纹路的弹性模量，以及垂直于纤维方向或纹路的弹性模量。松质骨对应的密度范围很广，因此图中分别用三个气泡来对应高密度、中密度和低密度。图中也给出了我们所熟悉的基准线 E/ρ、$E^{1/2}/\rho$ 和 $E^{1/3}/\rho$。每个都代表特定受载条件下的材料指标。

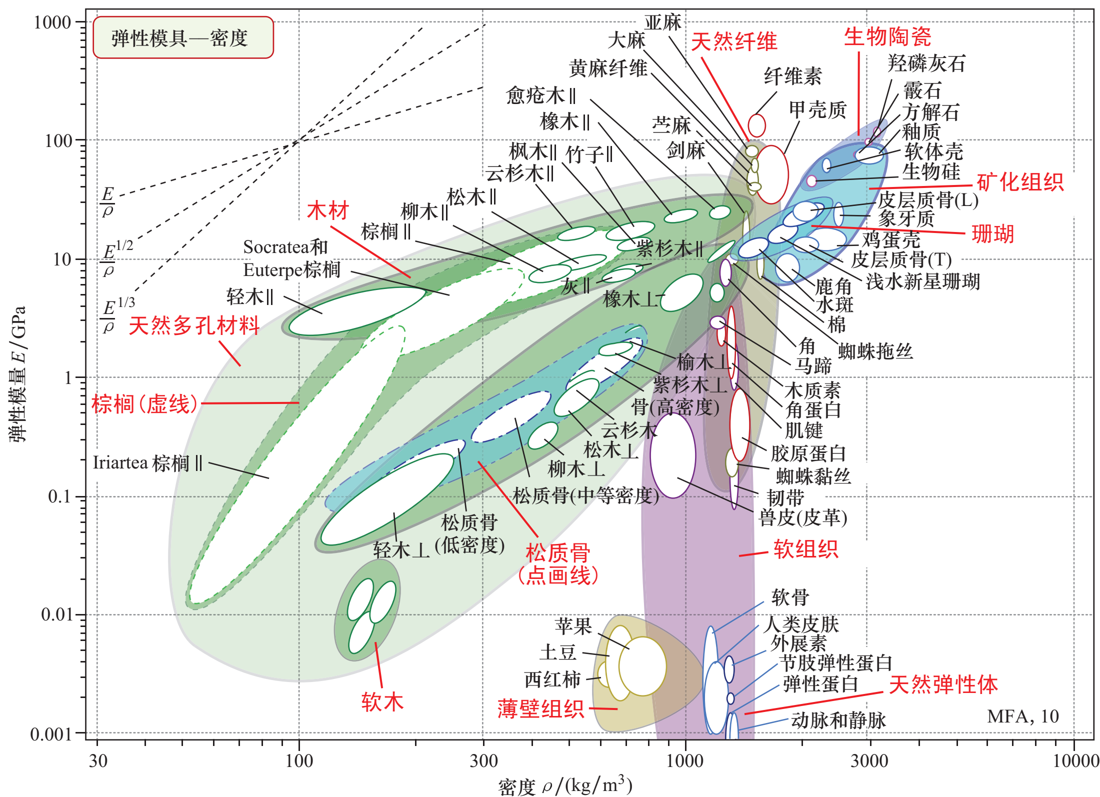


图 12.13 天然材料的材料性能图，两个坐标轴分别为弹性模量和密度

（基准线可用于确定保证强刚度要求的高效材料。）

注：‖—平行纹理方向；⊥—垂直于纹理方向。

根据卓越标准 E/ρ，纤维素是天然聚合物中拉伸性能最好的材料，它的拉伸性能是钢的 2.6 倍。正因为此，亚麻、大麻和棉花这类纤维才有很好的拉伸性能。由材料指标 $E^{1/2}/\rho$ 值可知，当加载方向平行于纹理方向时，木材、棕榈和竹子有很好的弯曲和抗屈曲能力。例如，巴沙木的弯曲性能是钢的 5 倍。

2. 拉伸强度—密度图

图 12.14 给出了天然材料的强度 σ_f 和密度 ρ 的关系，其中的色彩和包络策略类似于图 12.13。对于天然陶瓷材料，其拉伸强度是由弯曲梁的抗弯强度确定；对于天然聚合物和弹性体，其强度对应抗拉强度；对于天然多孔材料，抗拉应力是平台应力还是抗弯强度，取决于材料的性质。平行或者垂直于纤维或纹理方向的强度分别在图中做了描述。

针对抗拉强度需求的提升，我们需要找到对应 σ_f/ρ 值高的材料，而对于高抗弯强度或屈曲强度的需求，则需要我们找到对应 $\sigma_f^{2/3}/\rho$ 值高的材料。纤维素和丝对应的 σ_f/ρ 值最高，甚至比碳纤维还高。竹子、棕榈和木材对应的 $\sigma_f^{2/3}/\rho$ 值很高，因此有足够的抗弯曲失效能力。

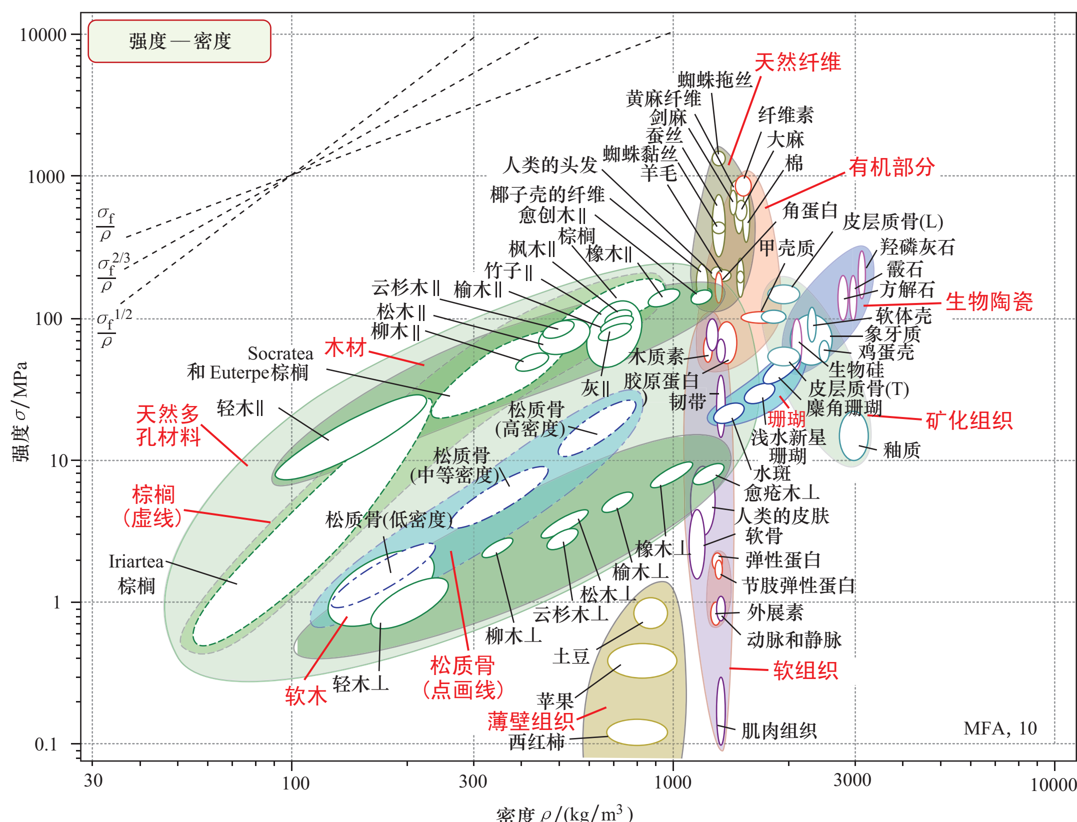


图 12.14 天然材料的材料性能图，两个坐标轴分别为密度和强度（基准线可用于确定保证轻且强要求的高效材料。）

3. 弹性模量—强度图

图 12.15 给出了天然材料的强度 σ_f和弹性模量 E 的关系。两种组合十分重要。对应 σ_f^2/E 值高的材料能够存储弹性能，适合用于弹簧；对应 σ_f/E 值高的材料有超常的回复能力。丝（包括蜘蛛网的丝）以其高效而著称，其对应的 σ_f^2/E 值超越了弹簧钢或橡木。材料对应的指标 σ_f/E 值越大，意味着材料允许回复的变形越大。基于这个原因，这种材料适合做弹性铰链。棕榈相对于木材来说，其对应的 σ_f/E 值更大，因此在大风中能够承受弯曲。自然界中的类似案例还有很多，如皮肤、皮革和软骨等。

4. 冲击韧度—弹性模量图

材料的韧度是指对抗裂纹扩展的能力。图 12.16 给出了天然材料的冲击韧度 J_C与弹性模量 E 的性能数据。如果要求零件吸收一定的冲击能量且保证不失效，那么最佳材料必须具有最大的 J_c值。这类材料位于图的顶端，包括鹿茸、蹄、角、竹子和木材等。如果要替换一个有裂纹的承载安全部件，最安全的做法是选择断裂韧度值 $K_{IC} \approx (E \cdot J_c)^{1/2}$最大的材料。图 12.16 中的对角等高线给出了对应的指标值。由此可见，软体动物壳和牙釉质在这方面的表现很好。

很多工程材料（如钢、铝以及合金）的 J_c和 K_{IC}值都比天然材料来得更大。然而，天然陶瓷如珍珠壳、象牙质、皮层骨以及牙釉质的冲击韧度依次增大，且都高于传统工程陶瓷（如氧化铝）。它们的韧性源自其分段结构。片状陶瓷如方解石、羟磷灰石或

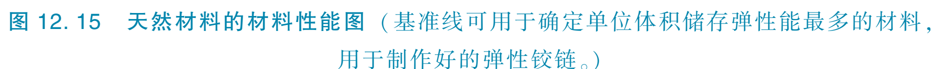


图 12.15 天然材料的材料性能图（基准线可用于确定单位体积储存弹性能最多的材料，用于制作好的弹性铰链。）



图 12.16 天然材料的材料性能图（基准线对应断裂韧度 $(E \cdot J_c)^{1/2}$。）

霰石，经由体积分数小的聚合物粘接在一起。这种聚合物通常是胶原蛋白。它们的韧性随着矿化度的减小，以及胶原蛋白的增加而增大。

5. 附言

上述图表证实了达尔文的观点，天然材料在不断进化中力求做到最好。犹如前述观点，天然材料是非常高效的。但是，它的意义远不止于此。若想进一步了解，可查阅扩展阅读中的书籍。

12.10 扩展阅读

下面是关于天然材料的阅读资料。

1）Beukers，A.，& van Hinte，E. （1998）. *Lightness. The inevitable renaissance of minimum energy structures.* 010 Publishers，ISBN 9064503346.

2）Currey，J. D.，Wainwright，S. A.，& Biggs，W. D. （1982）. *Mechanical design in organisms.* Princeton University Press，ISBN 0691083088.

3）Gibson，L. J.，Ashby，M. F.，& Harley，B. A. （2010）. *Cellular materials in nature and in medicine.* Cambridge University Press，ISBN 9-7805-2119-5447.

一本关于自然界中多孔材料结构、力学和用途的专著。

4）McMahon，T.，& Bonner，J.（1983）. *On size and life.* American Books，ISBN 0716750007.

5）Sarikaya，M.，& Aksay，I. A.（Eds.）（1995）. *Biomimetics：Design and processing of materials.* AIP Press，ISBN 1563961962.

6）Thompson，D'A. W.（1992）. *On growth and form.* Dover Publications，ISBN 0486671356.

7）Vincent，J. F. V. （1990）. *Structural biomaterials* （*revised ed.*）. Princeton University Press，ISBN 0691025134.

8）Vincent，J. F. V.，& Currey，J. D.（1980）. The mechanical properties of biological materials. In *Proceedings of the Symposia of the Society for Experimental Biology*，34. Cambridge University Press for the Society for Experimental Biology.

工艺与工艺选择



图 13.0　压铸（感谢纽约托马斯出版社提供的图片。）

13.1　引言

工艺是对材料进行成形、连接或精饰的一种方法。现有的工艺足有成百上千种，包括砂型铸造、注塑、熔焊和电解抛光等。对于特定的零件，工艺的选择取决于零件所使用的材料、零件的大小、形状和精度要求，还有零件的需求量。简而言之，工艺的选择取决于零件的设计要求。

为便于进行工艺的选择，我们首先应对所有的工艺作一下分类。本章 13.2 节给出了相应的分类方式。按此分类结构，本章 13.3 节对各类工艺及其可处理的材料、可加工的形状和可获得的精度作了详细的论述。

加工工艺具有双重功效，其一是材料的成形、连接和精饰，另一个则是性能控制。金属经轧制和锻造后得以强化；钢材可通过热处理来提高硬度和韧性；聚合物经拉拔可提高模量和强度；陶瓷经热压也可提高强度。工艺和性能之间的关系会在本章 13.4 节中加以细致分析。

工艺选择是本章 13.5 节和 13.6 节的主题，其目的在于找出属性特征与设计要求最为匹配的工艺。在使用其中提到的方式时，不应忘记材料、形状和工艺之间是相互影响的（见图 13.1）。材料性能和形状会对工艺选择有所限制。针对韧性材料，我们可以借助锻造、轧制和拉拔工艺。针对脆性材料，则必须借助粉末法。在适中的温度下可熔化成低黏度液体的材料，可借助压铸工艺，无须考虑其他工艺路线。形状同样会对工艺的选择产生影响。轧制或拉拔可以很容易成形细长的形状，但铸造则不行。中空

形状无法用锻造方式成形，但可以借助铸造或模塑工艺。反之，加工工艺也会影响零件的性能。轧制和锻造改变了金属的硬度和结构，使所含的夹杂物排成一条线，有效提供了材料的强度和塑性。热处理可用于控制材料的强度、塑性和韧性。复合材料是由特定的加工工艺制成，在处理前，它们仅仅是一些聚合物和纤维而已。

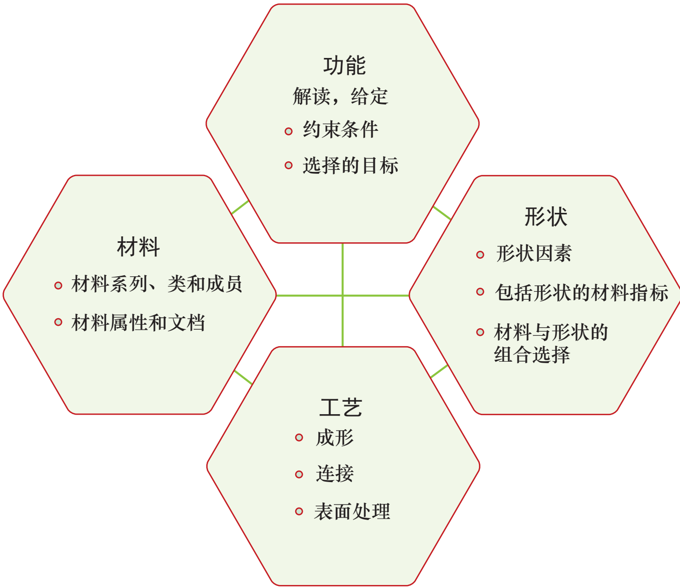


图 13.1 工艺选择取决于材料和形状（工艺属性将被用作选择的标准。）

类似于设计的其他方面，工艺选择也是一个迭代的过程。第一轮迭代可以获得一种或多种可行的工艺路线。此时，我们需要对设计进行重新思考，通过调整设计来尽可能地降低加工难度。最终的选择取决于工艺成本的对比结果。工艺成本可借助本章 13.6 节中的成本模型计算得到。此外，也取决于文档查阅，如参考手册、过往的案例以及应用该工艺路线的相关产品案例。文档查阅有助于处理工艺和材料性能之间的耦合问题。

与前述章节一样，本章末尾给出了小结以及扩展阅读列表。

13.2 工艺分类

制造工艺可按图 13.2 给出的方式进行分类。初次成形创造形状。图中第一行列举了六类基本的初次成形工艺，包括铸造、模塑、变形、粉末法、复合材料成型方法以及特种成形法（如快速原型）。二次加工工艺改变形状或性能，主要由切削加工和热处理两类工艺组成。前者用于在已成形件上新增特征，后者用于加强材料表面性能或体积性能。在此之后，是连接工艺和表面处理或精饰工艺。

图 13.2 以流程图方式清晰展示了制造路线的层层递进。但是，具体问题需具体分析。为满足不同的设计需求，这些步骤的顺序可以有所调整。这张图的要点在于阐明，工艺系列主要有成形、连接和精饰三种，且每一系列工艺的属性差别巨大，因此必须分开处理每一系列的数据收集和结构化操作。

为了捋清成形工艺的更多细节，我们需要借用第 5 章的材料分类方法，对工艺进

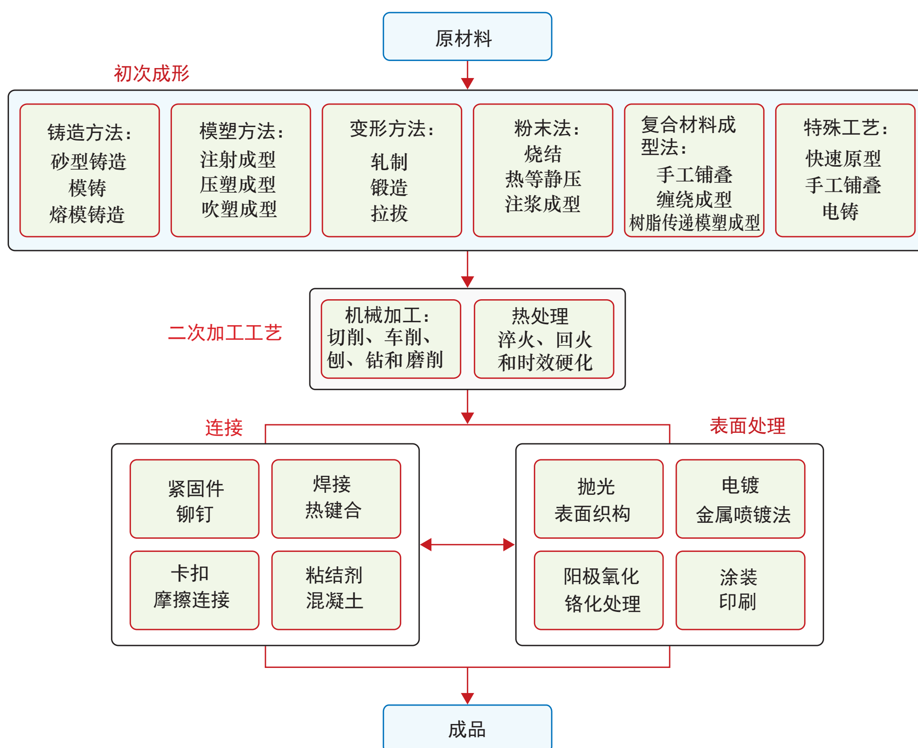


图 13.2 工艺的分类（第一排是成形工艺，接着是二次加工工艺（切削加工和热处理），再接着是连接和精饰（表面处理）工艺。）

行层次分类。图 13.3 给出了部分结果。工艺世界主要分为三大系列，即成形、连接和精饰。在这张图中，成形系列被展开成铸造、变形和模塑等等。其中，模塑又被进一步展开为滚塑成型、吹塑成型和喷射成型等等。每一类工艺都有其特定的属性，包括可处理的材料、可加工的形状、零件尺寸、精度以及最优批量。

成形系列的成员工艺展开

参考模塑工艺的展开方式，在同等细节层面上展开铸造工艺，可得到如下结果：

1） 砂型铸造
2） 成形铸造
3） 模铸
4） 熔模铸造

图 13.4 给出了连接和精饰两个系列成形工艺的展开结构（连接系列包含三大类：粘接、焊接和紧固。图中对焊接类工艺的成员工艺作了展开。如前所述，每种工艺都有各自的属性。）图中属性的第一行对应可用于连接的材料，随后的属性与成形工艺的属性有所不同。此时接头的几何形状以及受载的方式，与接头可否拆卸、是否防水和是否导电等需求一样重要。

此外，图 13.4 还显示了精饰系列工艺的展开结构，并给出了涂层类工艺的成员工艺。与成形和连接工艺一样，涂层材料也是非常重要的属性。其他属性则有所区别，最为重要的是明确涂层的目的（保护、表面硬化和装饰等），以及涂层自身的性能。

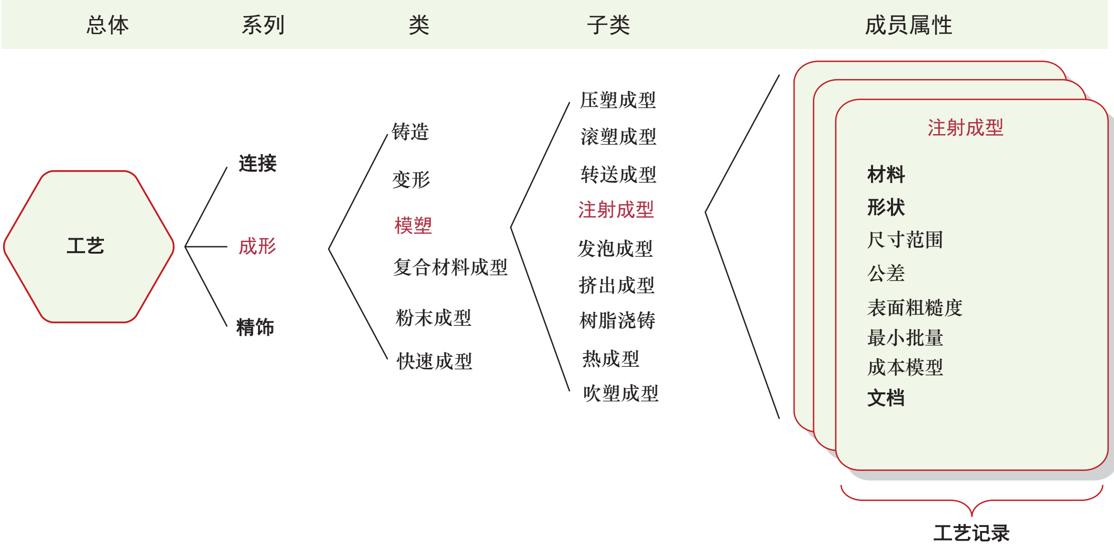


图 13.3 工艺分类图（其中成形系列工艺做了展开。每个成员工艺都有一组属性，工艺选择就是进行属性与设计要求的匹配操作。）

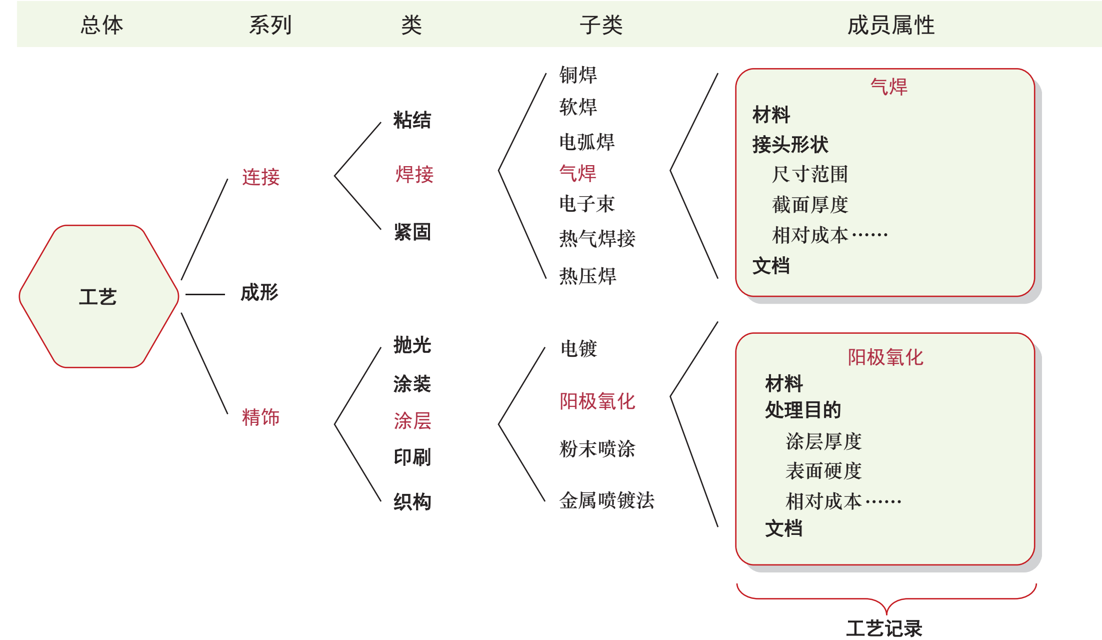


图 13.4 工艺分类图（其中连接和精饰系列工艺做了展开。）

连接系列的工艺展开

参考模塑工艺的展开方式，在同等细节层面上展开紧固工艺，可得到如下结果：

1）铆接
2）连接—紧固
3）螺纹紧固
4）缝制
5）卡扣

基于上述背景，接下来我们可以快速地浏览一下所有的工艺。我们力求尽可能简洁，详细信息可参阅本章13.9节扩展阅读中的书籍。

13.3 成形、连接和精饰工艺

13.3.1 成形工艺

1. 铸造

在铸造过程中（见图13.5），液体被浇灌到模具中，随后冷却至凝固。铸造与后面要介绍的模塑成型的区别在于两者所用液体的黏度不同。在铸造过程中，液体是在自重作用下（如砂型浇铸和熔模铸造）或适度压力作用下（如压铸和砂型压力铸造）流入并填满模具。一次性使用的砂型很便宜，但用于大批量压铸的金属模则很贵。介于两者之间，还有一些其他的铸造方法，如壳形件、熔模和石膏模等。

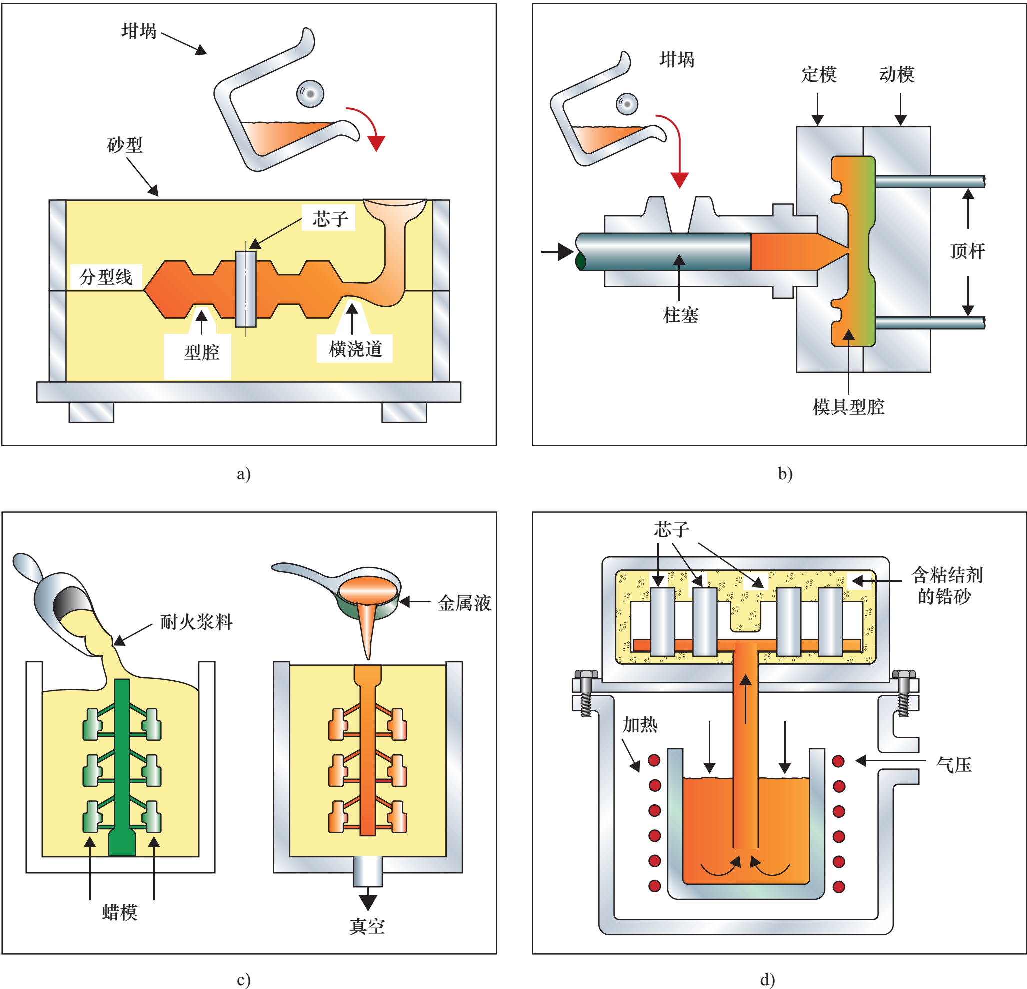


图13.5 铸造工艺

a）砂型铸造：液态金属被倒入拼合式砂模 b）模铸：金属液体在压力作用下流入金属模具

c）熔模铸造：将蜡模嵌入耐火材料中，然后将其熔化流出，再用金属液充满空腔

d）压铸：模具从底部开始填充，需对气压和金属的流动加以控制

铸型的设计应便于液体流至模具的各个部分，且呈顺序凝固的状态，避免缩孔的产生。对于截面厚度，应尽可能均匀（连接处的厚度不应超过 2 倍）。形状的设计要使得样品和最终铸件易于脱模。要尽可能避免键入式的形状，以防止固体冷却和收缩引起的热裂问题（拉伸蠕变断裂）。从砂型铸造到精密压铸，铸件的公差和表面质量逐级改善。本章 13.6 节给出了相应的量化结果。

金属液浇入模具后，呈紊流形态，因而可能将表面氧化皮和残渣带入铸件中，导致铸件缺陷。为避免上述缺陷，可以借助真空压力或气体压强，将金属液从模具底部按层流方式流入模具（见图 13.5）。

2. 模塑成型

图 13.6 显示了用于非常黏稠熔液的铸造工艺，比如热塑性塑料和玻璃。加热的黏稠液体在一定的压力下被压入或注射入模具，随后冷却至凝固。模具需要承受压力和

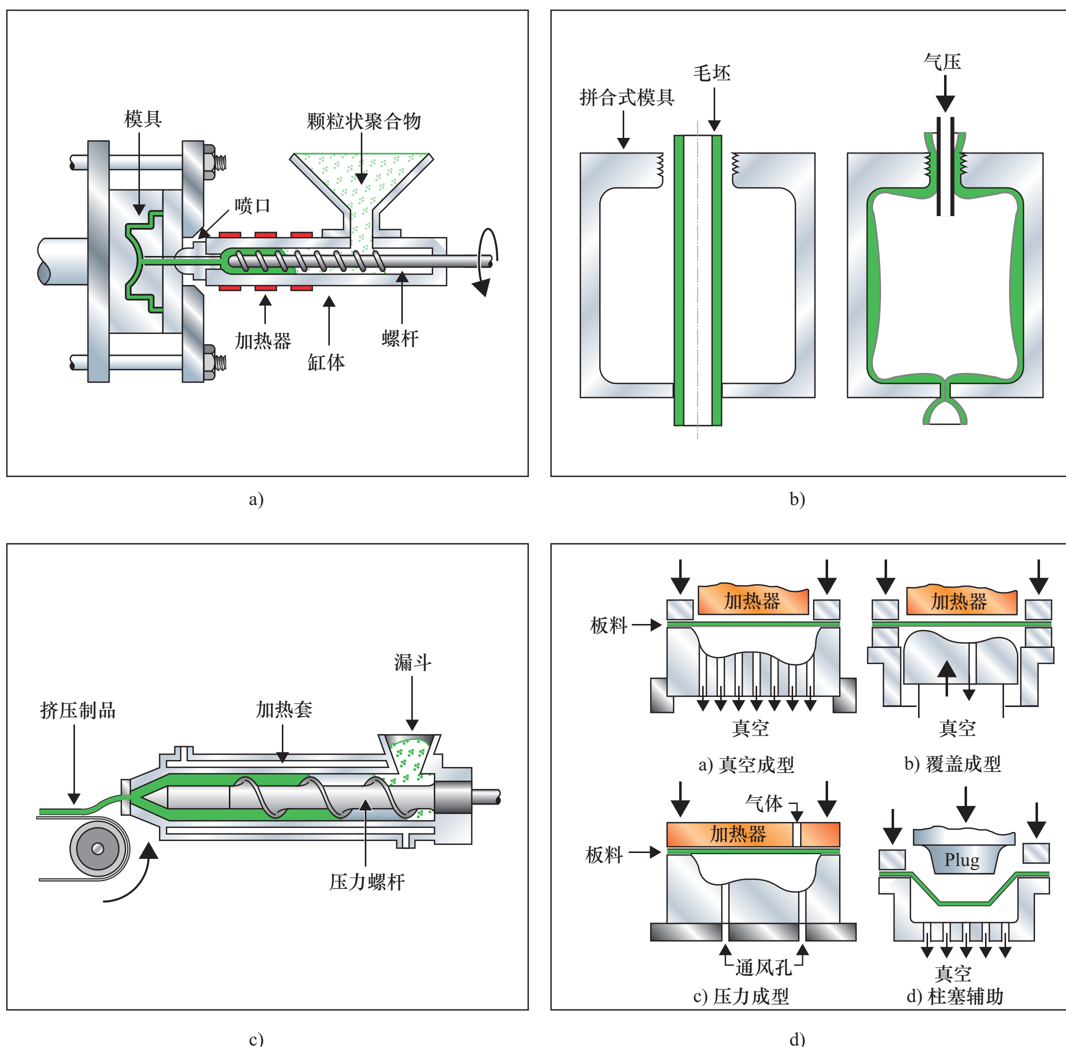


图 13.6 模塑成型工艺

a）注射成型：将颗粒状聚合物（或填充聚合物）加热，由螺杆加料器压紧并剪碎后压入模腔 b）吹塑成型：热的聚合物或玻璃管材坯料在气压作用下贴合模腔内壁 c）聚合物挤压：将材料挤入型腔模以得到不同截面的挤压制品 d）热成型：热塑性板料加热后在真空或气体压力下贴合阴模

温度的反复变化，以及开模和脱模所造成的磨损，因而它的价格非常昂贵。复杂形状的零件可以成型，但由此带来的模具形状也会很复杂，且零件脱模方式也会变得复杂。相对而言，热成型的模具较为便宜。相应的成型方式是用气压或真空将加热的片状聚合物与整体模具压合。类似地，吹塑成型是利用气压将聚合物或玻璃坯料展开，与拼合式型腔模贴合。这是一种快速、低成本的工艺，可用于低价产品（如牛奶瓶）的大批量生产。类似金属的聚合物可以采用这种挤出成型的方式，实际上所有的棒材、管材以及其他菱形截面的材料都是采用这种工艺制成的。

3. 变形工艺

由图 13.7 可知，变形过程可以是热成形、温成形或冷成形。分类的依据是材料的

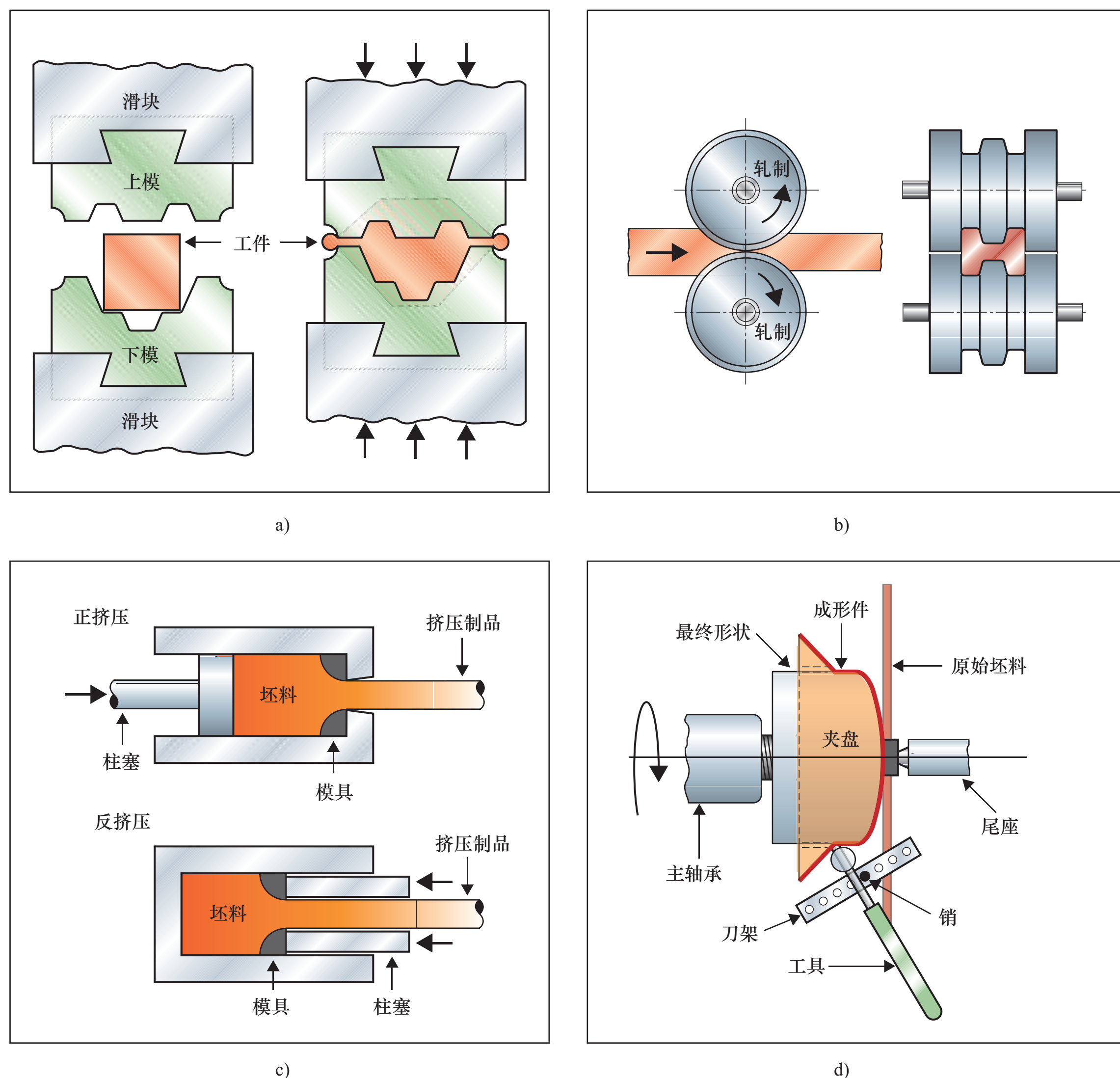


图 13.7 变形工艺

a）锻造：利用压力机和上下模来使金属发生变形 b）轧制：板料或棒料在轧辊间受压应力作用而使得截面减小 c）挤压：金属从凹模孔被挤出，呈连续棱柱形（上述三种工艺都可以是热成形（$T>0.85T_m$）、温成形（$0.55T_m<T<0.85T_m$）或冷成形（$T<0.35T_m$） d）旋压：通过光滑圆头工具的连续掠过，使得金属涡流盘与木模贴合成形

熔点 T_m。尽管挤压、热锻和热轧（$T>0.85T_m$）过程中材料处于固态而非液态，但它们与模塑成型有很多共同点。高温使得材料的屈服强度降低，与此同时材料会发生再结晶，两者的共同作用导致成形力降低。温成形（$0.55T_m<T<0.85T_m$）过程中材料会发生回复，但不会出现再结晶。冷锻、冷轧和冷拉（$T<0.35T_m$）利用加工硬化来提高产品的硬度，但由此带来的后果是成形力较大。

锻件的设计需要避免厚度与曲率的急剧变化，因为两者的急剧变化会造成局部大变形，从而造成材料开裂或折叠。金属热锻允许较大的形状变化，但由于氧化和翘曲的影响，产品表面质量较差且公差较大。冷锻可得到较高的精度和表面质量，但成形力非常高，而且变形受到加工硬化的限制。

4. 粉末法

粉末法是采用压紧和烧结细颗粒状材料来获得所需要的形状（见图 13.8）。粉末可

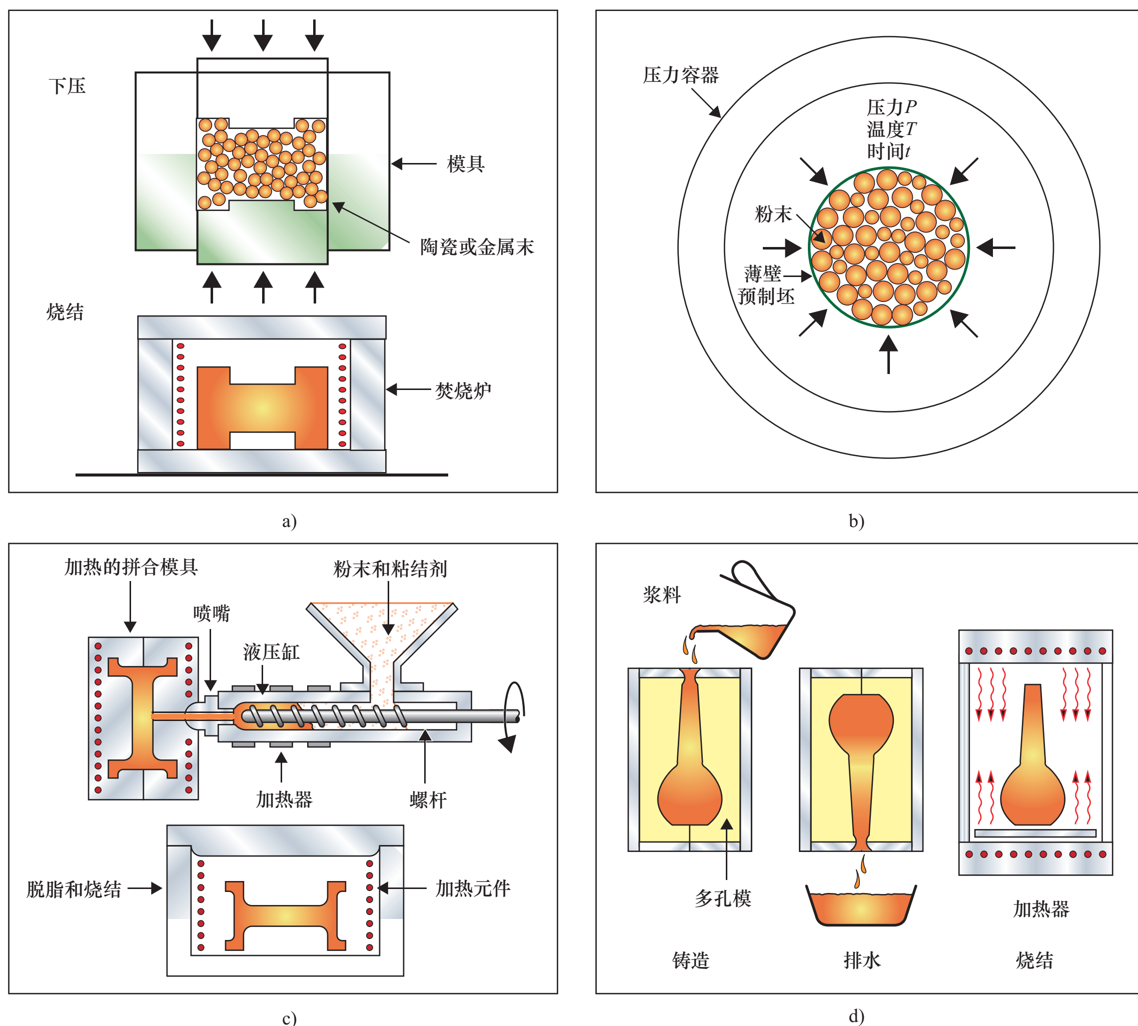


图 13.8 粉体加工

a）模压烧结成型：粉末与粘结剂在模具中被压实，随后生坯被加热以获得致密的产品 b）热等静压成型：将粉末置于薄壁型外壳或预制坯中，随后进行加热并在外部气压作用下压实

c）粉末注射成型：粉末和粘结剂被注射入模具形成生坯，然后进行加热 d）注浆成型：将水基粉末泥浆导入吸水的多孔石膏模，形成泥浆壳，然后进行加热

以先冷压，然后烧结（加热到 $0.8T_m$，实现扩散结合）；也可以压入加热的模具中，或将粉末置于薄薄的预成型坯料中，然后在静水压下加热（热等静压）。对于高熔点或难变形的金属可通过化学方法将其制成粉末，然后用粉末法来成形。但这种方法并不局限于上述难加工材料，几乎任何材料都可以被制成粉末，并采用压紧和加热粉末来成型。

粉末法被广泛应用于小型金属零件（如汽车和电器中的齿轮与轴承）的制造。这种方法较为节省材料，因而比较经济。对于那些难以用铸造、变形和切削加工方式处理的材料，也可以采用该方法来制造零件，且其产品只需微小或不需要精饰操作。由于压力无法在粉末床间均匀传送，模压粉末零件的长度不能超过它直径的 2.5 倍。截面应尽可能均匀，因为角落周围的粉末很难流动。此外，形状要简单并易于从模具中取出。

陶瓷难于铸造且无法变形，因此一般采用粉末法来成型。注浆成型法是将水基粉末浆注入石膏模具，模具内壁吸收水分，由此可在模壁内侧留下一个表面半干的泥浆壳。将剩余的液体排出，干燥部分可被加热烧结成陶瓷体。粉末注射成型（火花塞绝缘体的制造方法）是基于传统方式来实现陶瓷粉末和聚合物粘合剂的模塑成型，即对模制品进行加热，燃烧粘合剂和烧结粉末。

5. 复合材料成型

如图 13.9 所示，复合材料成型方法主要用于制备连续或短纤维增强聚合物基复合材料。通过纤维缠绕或将预浸碳、玻璃或芳纶纤维水平层叠至一定的厚度，然后压紧、固化，可制造大型零件。其中的部分过程可采用自动化操作，但依然是一个漫长的制造路线。如果该零件是关键部件的话，还需要进行全面的超声波探伤试验以检测零件的完好性。要想获得更高的完好性，可以采用真空袋或袋压成型法，在聚合之前先将气泡挤出基质。层叠成型法适用于小批量的高性能定制零件。

大部分常规零件（如保险杠和网球拍）是由短纤维增强复合材料制成，通过在模具中压紧和加热含纤维的树脂（团状模塑料或片状模塑料）这种方式来制成，或者将液体混合物注入模具中进行成型。流型图对于纤维的矫正至关重要，因而设计师必须与制造商紧密合作，以便于充分利用复合材料的性能。

6. 快速原型系统

可以利用 CAD 实体建模软件生成的数据来制造形状复杂的产品（见图 13.10）。它的动机在于可视化，因为一个物体的美感只有在看到原型时才能被人们所体会。它是一种模型制造工艺，是传统制造工艺（如铸造）用模具的主要制造手段。对于复杂装配，这类工艺可用于验证复杂几何形状，确保零件符合尺寸要求、可有效装配且易使用。

所有的快速原型系统都可用于制造含内型腔、悬壁和横向特性的复杂形状零件，但是当前的最优精度为±0.3mm。所有的快速成型法都采用层层堆积的方式，类似于 3D 打印但比较慢。通常单个零件所需要的时间为 4～40h。对于快速成型方法，至少可分为六大类：

1）将热塑性材料像挤牙膏一样从扫描头中挤出一层（熔融层积成型，FDM），或挤出一小滴（冲击颗粒制造），或像喷墨打印一样喷出图形阵列（3D 打印）来构建形状。

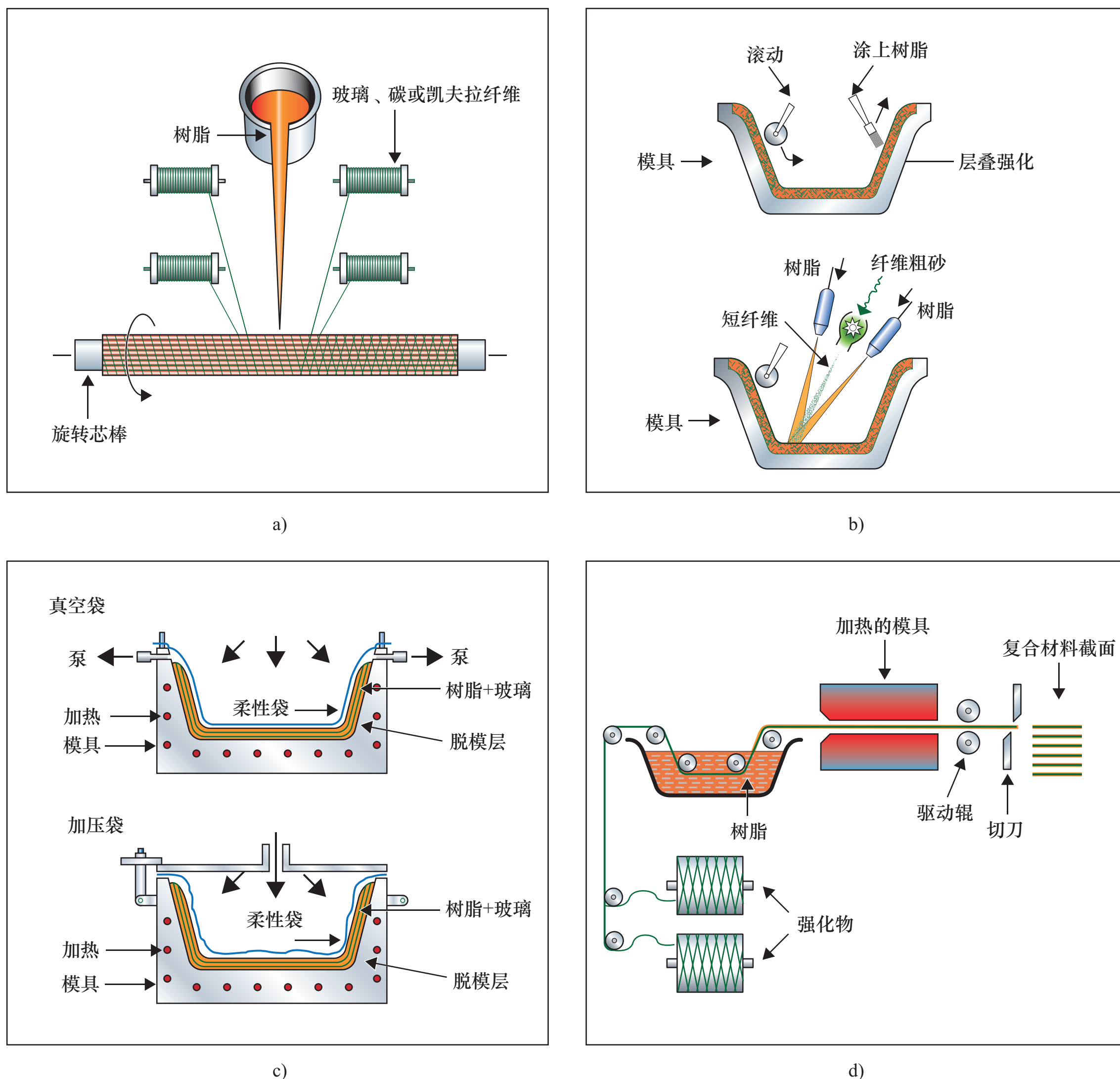


图 13.9 复合材料成型方法

a）纤维缠绕成型：将玻璃、凯夫拉或碳纤维缠绕到预浸的树脂和固化剂混合物 b）手工铺叠与喷射成型：将纤维强化物层铺在表面涂有树脂和固化剂混合物的模具上 c）真空袋和袋压成型：将预浸在树脂和固化剂混合物中的纤维强化物层层铺好，压紧并加热使其发生聚合 d）拉挤成型：将纤维经由树脂槽送入加热的模具，从而形成连续柱状截面

2）利用激光扫描使得光敏单体产生聚合（立体光固化成型，SLA）。每一次扫描后，工件被逐步降低，以便于新的单体涂覆于工件表面。

3）利用扫描激光束切割纸张，单层纸张切割后与下一层纸张热连接在一起。

4）与微电路制造类似的隔板技术（光掩膜法）。紫外线透过一系列隔板使得光敏单体产生聚合，逐层成型。

5）选择性激光烧结（SLS），可以将热塑性塑料、金属，或陶瓷直接制成零件。如同 SLA，用激光扫描粉末床，使激光照射的表层烧结。然后将一层新的粉末铺到材料表面，重复进行表面激光烧结，直至建成三维实体。

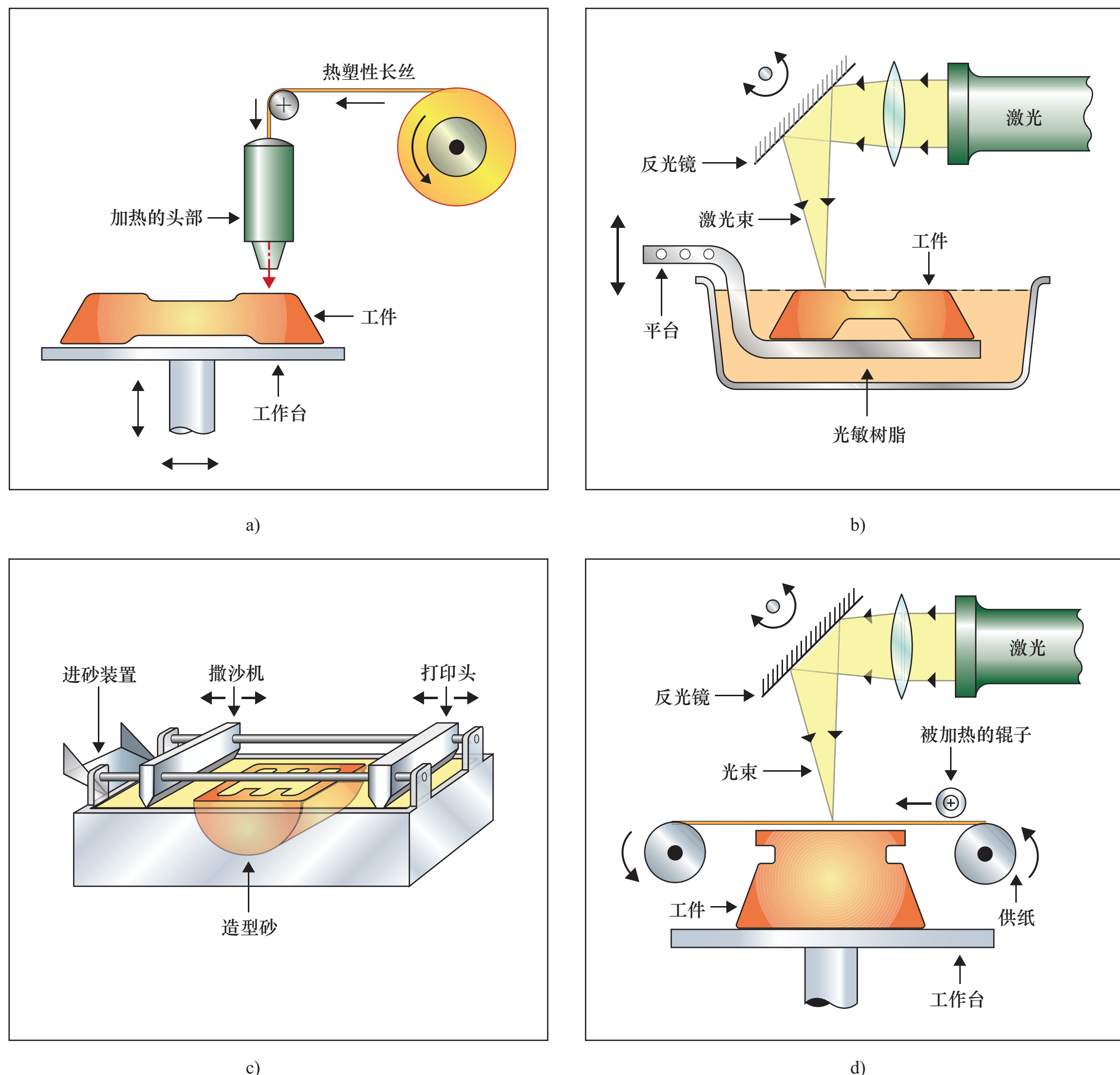


图 13.10 快速成型

a）沉积成型和冲击颗粒制造：实体由聚合物液滴层层沉积而成 b）立体光固化成型：实体形状是由光敏树脂聚合物层层堆叠而成 c）直接模具造型：砂型模具是由扫描打印头选择性地层层喷射粘合剂而成 d）层片叠加制造：实体是扫描激光束对铺叠的纸张进行切割后，再与热敏性聚合物粘接而成

6）砂模，适用于大型复杂金属零件的制造。多喷嘴打印头将粘合剂喷射在松散的型砂上可得到砂模，方法如同激光烧结但却更加快速。完成后，除去模具上的松散砂粒，即可用于传统铸造工艺。

为提高效益，我们可以使用快速原型系统制造硅胶模具，从而用高温树脂或金属材料进行复制品的铸造。

几乎所有的工程零件，无论是由金属、聚合物还是陶瓷制成，都需经过一定程度的切削加工（见图 13.11）。为此，工件的设计应确保易于夹持，并且保持高对称性，因为对称形状所需的操作最少。金属的切削加工性能差异很大，体现在切屑形成的难易程度、光滑表面获取的能力以及刀具寿命的性价比方面。切削加工性能越差，意味

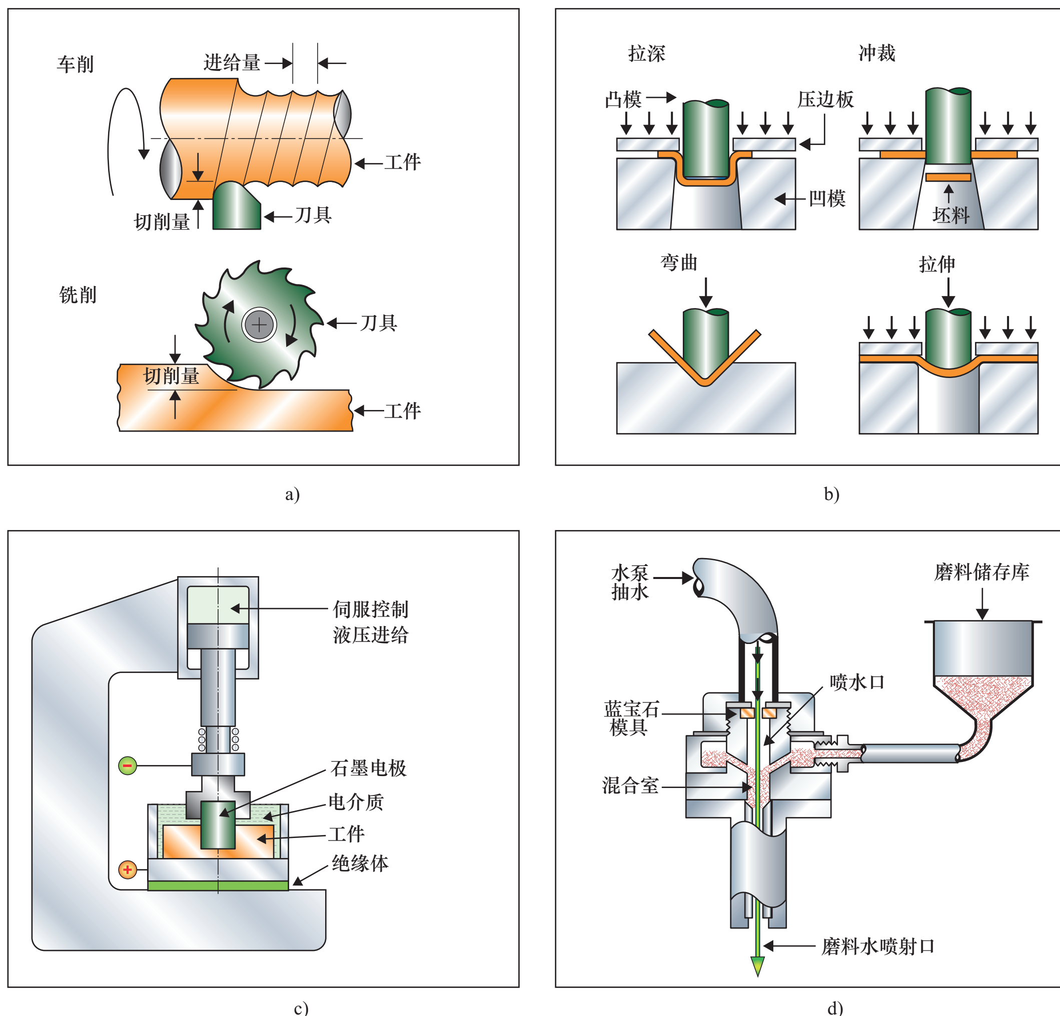


图 13.11 机械加工

a）车削与铣削：利用尖硬的刀尖从工件表面切下碎屑 b）拉深、冲裁和拉伸：板料经变形和冲切得到平整和碟形形状 c）放电加工：利用浸在电介质（石蜡）中的石墨电极和工件之间放电所产生的电蚀作用来获得所需要的工件形状 d）水切割：利用夹带磨料的高速水流按一定路径切割材料

着加工成本越高。

大部分聚合物采用模塑成型工艺得到最终的形状，必要时也可进行切削加工，但其低弹性模量使得切削加工过程中易于产生弹性弯曲，对精度有所限制。陶瓷和玻璃可以通过磨削和研磨获得很高的精度和表面质量。对于很多特殊应用，还有一些特种加工技术，包括放电加工（EDM）、超声切割、化学铣切、水沙切割、电子束切割以及激光束切割。

板料成形包括冲裁、弯曲和拉伸。直径小于板厚的小孔无法用冲裁方式获得。板料的最小弯曲半径（即成形性），可用厚度的倍数来表示。倍数为 1 时，代表成形性好；倍数为 4 时，代表成形性中等。零件的弯曲半径应尽可能取的大一些，绝对不能小于板料的厚度。成形性也代表了板料在不产生缩颈或失效的前提下可拉伸的程度。成形极限图能够给出更为精确的信息，即板料失效时刻板面内的主应变组合。零件设

计不允许超过极限失效应变。

切削加工通常被用作为二次加工工艺，用于提高铸造、模塑成型或粉末成型零件的尺寸精度和表面质量。越高的精度和表面质量要求，意味着越高的加工成本，因此需避免两者的过定义。

13.3.2　连接工艺

图 13.12 给出了许多连接技术。几乎任何材料都可以采用粘结剂连接，但要想得到可靠且持久的连接很困难。螺栓、铆钉、U 形钉和卡扣连接常被用于聚合物与金属的连接，且在必要时它们可以被拆开。焊接作为连接系列工艺的最大工艺类，被广泛应用于聚合物与金属的黏合。对于连接系列工艺的任意工艺类，各自都有特殊的处理

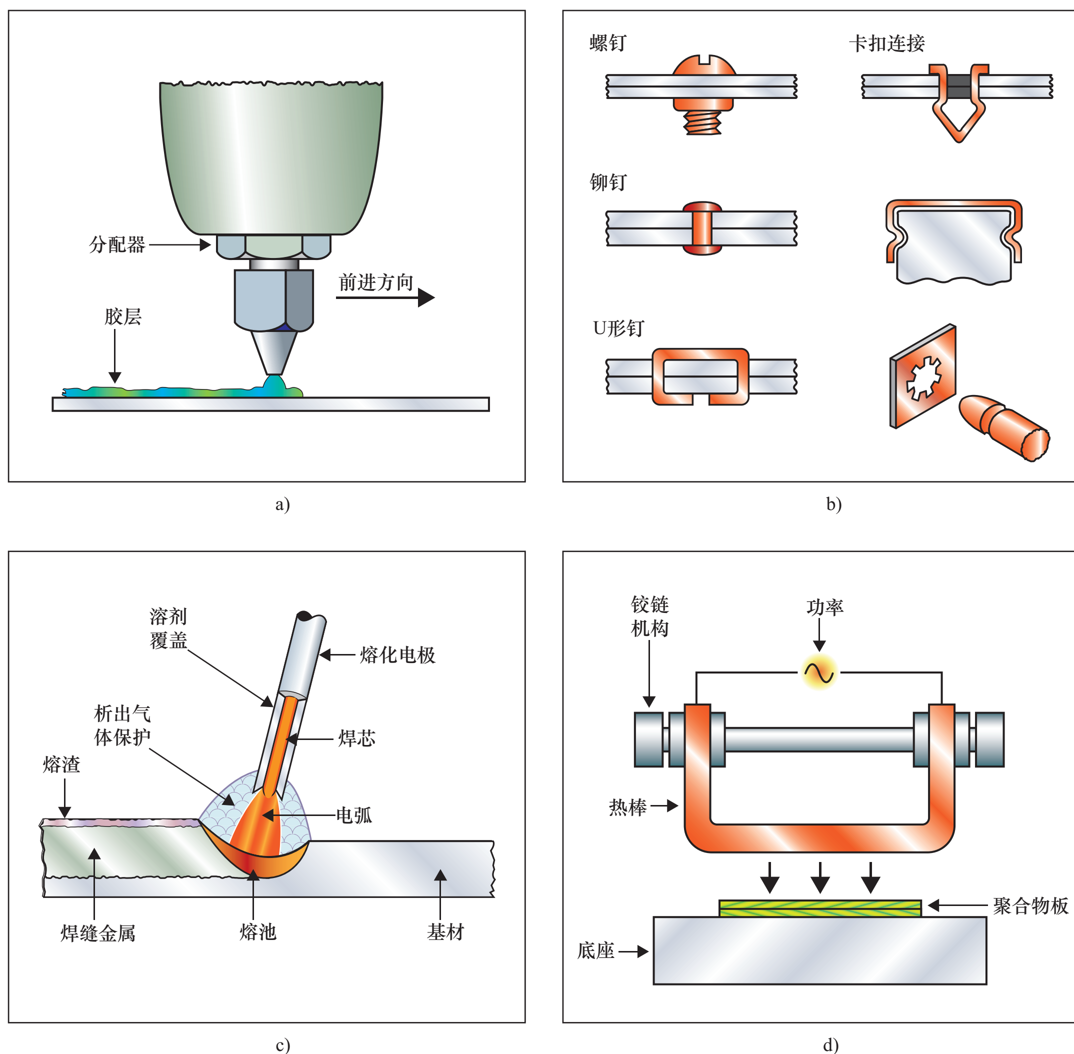


图 13.12　连接方法

a）粘接：在某一表面涂覆一层粘结剂膜，然后与配合面用力压紧　b）紧固：通过螺栓、铆钉、U 形钉、穿过式卡扣、推入式卡扣或杆板卡扣来实现连接　c）金属熔焊：焊条材料与熔化后的金属相结合或形成覆盖层　d）热塑性聚合物焊接：对聚合物零件进行加热，同时压紧它们使之连接在一起

技术。摩擦焊和摩擦搅拌焊利用摩擦生热和变形实现不同金属间的连接。陶瓷可利用扩散粘接的方式实现与陶瓷、玻璃或金属的连接。

假如零件需要进行焊接，那么零件材料必须具有好的焊接性。类似于切削加工性能，焊接性是几项基本指标的综合体现。导热系数低的材料在焊接时需要的热量低，但冷却时会产生较大的扭曲。热膨胀系数低的材料产生的热应变较小，因而冷却时发生扭曲的风险也就小。固溶体通常优于时效强化的合金，因为在焊接热影响区两侧，会发生过时效和软化。

焊接会导致内应力，内应力的数值接近于母材的屈服强度。内应力可以通过热处理来释放但成本高，因而最好的办法是采用好的设计来降低内应力。为了实现这一点，焊接件应尽可能等厚度，焊点应处于应力或挠度最小的地方，此外焊点总数应尽可能少。

大规模使用紧固件的成本很高，焊接、压接或使用粘合剂会更加经济。面向装配的设计方法给出了一份设计指南来最小化装配时间。

13.3.3 精饰工艺

精饰工艺涉及零件的表面处理或装配的处理，其中一些用于提高力学性能或其他工程性能，还有一些用于外观美化。

1. 精饰处理用来提高工程性能（见图 13.13）

磨削、研磨和抛光可以提高零件的精度和平整度，对于轴承表面尤其重要。电镀是在零件表面沉积一层薄金属层，以提高耐蚀性和耐磨性。电镀和涂装很容易用于大型外凸表面，但是难以处理通道、裂缝和槽这类形状。阳极氧化、磷化处理和铬化处理是在表面形成一层氧化层、磷化层和铬化层来提高抗蚀性。

热处理是很多材料的加工工艺路径中不可缺少的一环。时效硬化铝合金、钛合金和镍合金的强度源于精心设计的热处理工艺（高温淬火+低温时效）所产生的沉淀物。钢的强度和韧性可以采用类似方法来加以控制，即从奥氏体化温度（约 800℃）开始淬火并回火。相应的热处理可针对零件整体进行（如整体渗碳），或只是针对表面层（如火焰淬火、感应淬火和激光表面淬火）。

淬火是在快速冷却条件下的热处理工艺，突然的热收缩会造成极大的应力使得零件发生扭曲或开裂。该应力是由温度的不均匀分布所造成，而温度的不均匀分布则与零件的几何形状有关系。为避免产生急剧破坏性的内应力，零件的截面厚度应尽可能均匀，且任意区域的厚度都不能太大，从而确保淬冷率低于有效热处理所对应的临界值。此外，应避免应力集中的现象出现，它容易造成淬火裂纹。材料经模塑成型或变形后都可能含有内应力，这些内应力可以通过去应力退火（另一种热处理工艺）全部或部分消除。

2. 精饰处理以增加美观性

精饰工艺可用于提高材料的视觉和触觉特性，电镀和阳极氧化就是典型的例子。还有很多其他的工艺，如图 13.14 所示，其中涂装是应用最为广泛的一种工艺。有机溶剂涂装能获得耐用的高质量涂层，但会造成环境问题。水基溶剂涂装能克服上述问题，但变干较慢，且最终的涂膜并非完美。在聚合物粉末涂装和喷涂中，尼龙、聚丙烯或者聚乙烯之类的热塑性材料会被沉积在表面，用以获得色泽明亮的保护层。

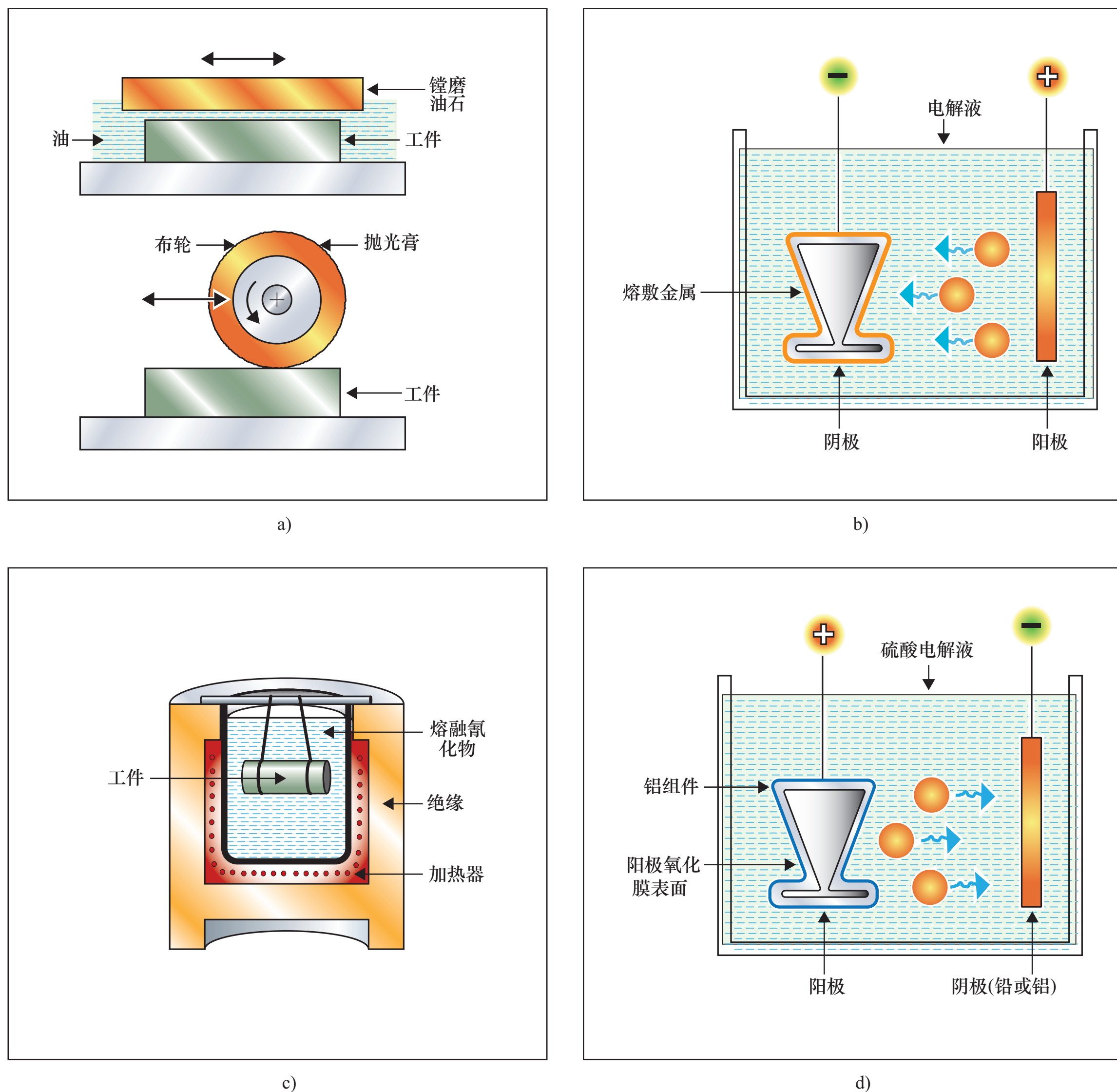


图 13.13　精饰工艺可用以保护和提高零件的性能

a）机械抛光：利用细研磨粒移除材料来改善表面粗糙度和提高表面精度　b）电镀：在电镀槽中通过电解沉淀将金属涂覆到工件表面　c）热处理：将粉末床或熔浴中的碳、氮、磷或铝向工件表面扩散来提高其硬度和耐蚀性　d）阳极氧化：利用氧化浴中的电势梯度在工件表面形成氧化层（工件必须是铝、镁、钛或锌）

丝网印刷是用橡胶滚轴将油墨压到丝网上，通过一定的压力使油墨通过丝网的孔眼转移到承印物上，形成图像或文字。全色印刷最多需要连续使用四块丝网。丝网印刷被广泛应用于平面设计。曲面需要使用移印技术，即给刻着移印图案的金属板涂上油墨，并印在软橡胶垫上。随后，将软橡胶垫压紧在产品上，由于柔软的橡胶可以贴合曲面，因而能在产品表面印出图案。

想要了解这些工艺的更多细节，读者可以继续阅读本章 13.9 节的扩展阅读。接下来我们将简单介绍下工艺对性能的影响。

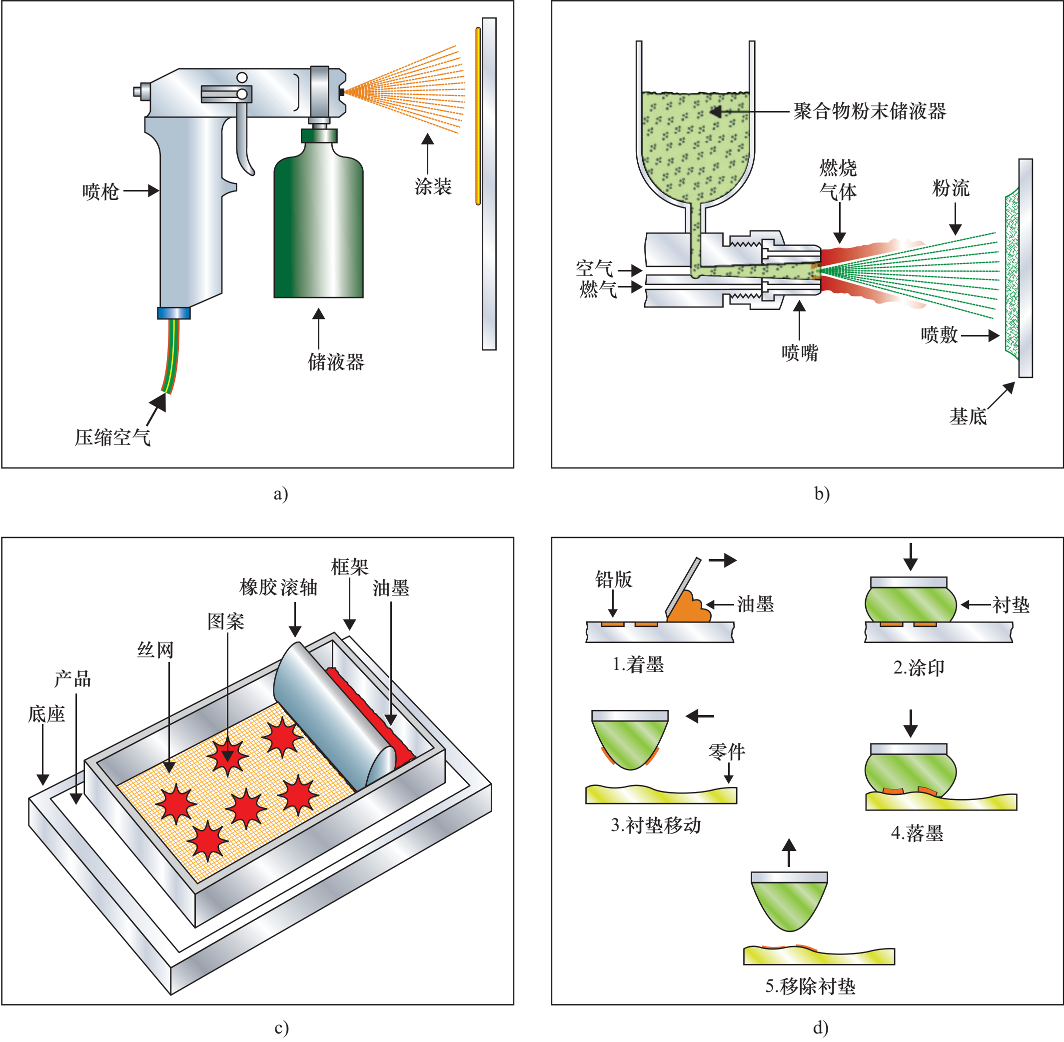


图 13.14 精饰工艺可增加美观性

a）涂装：将有机溶剂或水基溶剂喷涂在需装饰的表面 b）聚合物粉末涂装：通过气火焰直接喷涂或将加热的工件浸入粉末床，使工件表面沉积一层热塑性材料 c）丝网印刷：将油墨经由印有图案的丝网涂到工件表面，只有选定区域油墨才能通过 d）移印：将油墨图案印在衬垫上，再转移到承印表面，该表面可以是曲面或不规则形状

13.4 工艺对性能的影响

在材料性能图中，气泡的范围代表了材料性能可由工艺调控的程度。图 13.15 是弹性模量与强度的关系图，说明了金属的这两种性能可由合金化、热处理和冷加工所调控的程度。复合材料的气泡形状变化反映了纤维含量与方向对其性能的影响；泡沫的气泡形状差别则反映了发泡的程度对泡沫性能的影响，发泡的程度可由多孔性或相对密度来衡量（第 11 章）。聚合物和弹性体的弹性模量与强度取决于链的长度和交联程度。它们作为结构的一个方面，由工艺过程直接控制。陶瓷的强度取决于多孔性，它是微观组织的一个方面，也受工艺过程的影响。

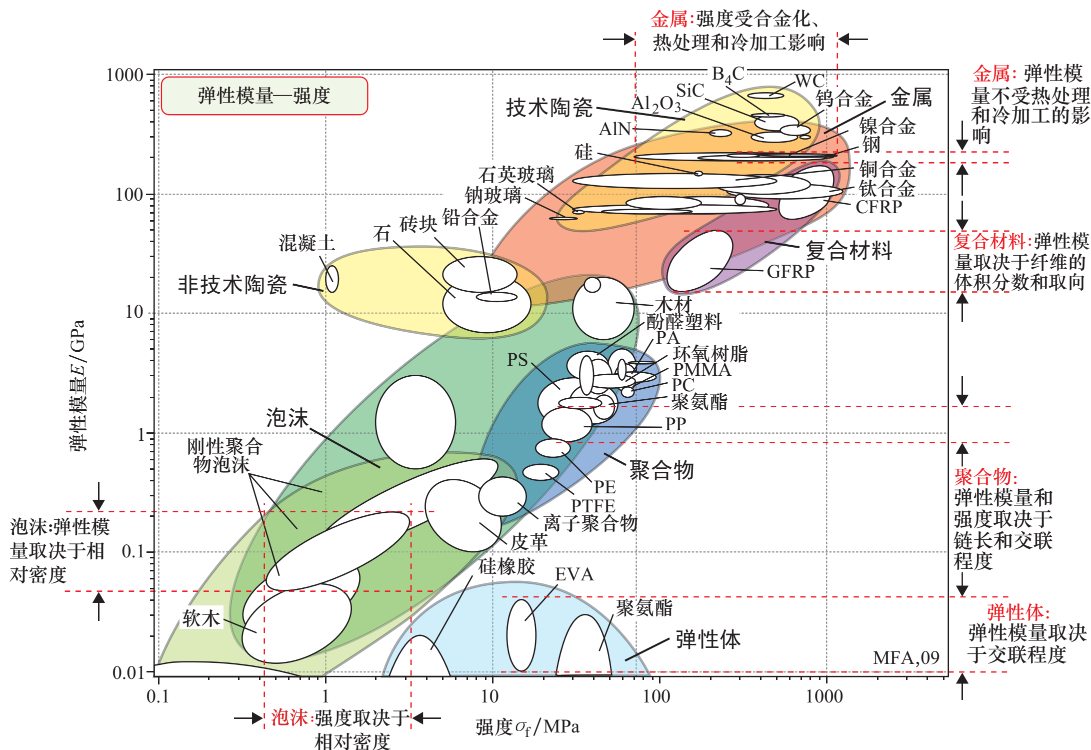


图 13.15 性能图表中材料气泡的范围代表材料性能可由工艺调控的程度

本书第 11 章的图 11.7 和图 11.10 给出了纤维含量、形状和取向对复合材料性能的影响。此外，图 11.24 阐述了泡沫密度和连接度对多孔实体性能的巨大影响。聚合物的强度变化倍率约为 5，而断裂韧度的变化倍率则为 20，具体数值由其化学成分、链长以及交联程度决定。混合、填充、强化或塑化作用可以使得聚合物的性能发生更大的变化。图 13.16 给出了上述方式对聚丙烯的弹性模量 E 和断裂韧度 K_{IC} 的影响。通过与弹性体（如 EPR 或 EDPM）的混合或共聚合作用，它的弹性模量会降低但与此同时断裂韧度 K_{IC} 和冲击韧度 G_C 会有所提高。填充不贵的粉末态玻璃、滑石或碳酸钙，其弹性模量可提高两倍，但由此带来韧性的降低。塑化（与低分子量聚合物混合）能大幅度降低弹性模量。上述工艺可引起的聚合物弹性模量的变化倍率约为 100，韧性的变化倍率约为 10。

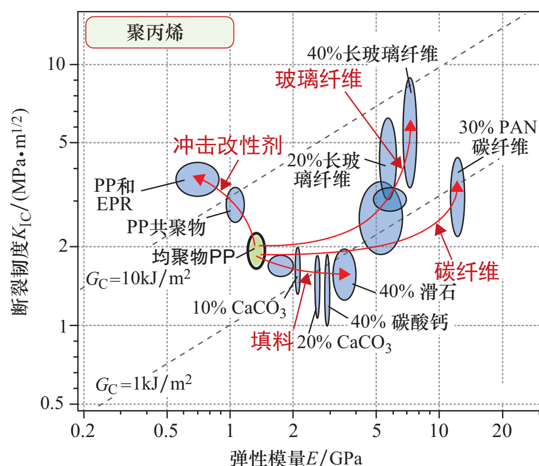


图 13.16 填料、冲击改性剂和纤维对聚丙烯强度与韧性的影响

在材料学家和工程师对金属及其合金性能的研究中，对材料强度的研究最为深入。个中缘由可从表 13.1 给出的应用中一窥究竟。固溶强化、沉淀强化以及加工硬化的相辅相成可得到所需要的强度和韧性组合。图 13.17

阐述了铜合金在这些强化机制作用下可实现的强度提升。然而，事物都有两面性，强度的提升会造成延展性的降低。图中，延展性以断裂时刻的延伸率 ε_f 为衡量标准。

表 13.1 金属合金及其典型应用（标识强化机制）

合金	典型应用	固溶强化	沉淀强化	加工硬化
纯铝	厨房箔纸			√√√
纯铜	电线			√√√
铸造铝，镁	汽车零部件	√√√	√	
青铜(Cu-Sn)，黄铜(Cu-Zn)	船舰部件	√√√	√	√
不可热处理锻铝	船、罐头和结构件	√√√		√√√
可热处理锻铝	飞机，结构件	√	√√√	√
低碳钢	汽车车身，结构件，船，罐头	√√√		√√√
低合金钢	汽车部件，刀具	√	√√√	√
不锈钢	压力容器	√√√	√	√√√
铸造镍基合金	喷气发动机涡轮	√√√	√√√	

符号：√√√=经常使用；√=偶尔使用

强度和延展性对结构敏感，它们随材料成分和微观结构而定。相应地，材料成分和微观结构又受工艺的限制。此外，硬度、疲劳强度、导热系数和电导率都对结构敏感。通过微调工艺参数，我们可以获得特定的性能组合。类似图 13.16 和图 13.17 这样的袖珍型性能图，对此作了清晰地阐述。对于传热材料（用于热交换器和化工设备），通常要求好的导热性和高强度。图 13.18 给出了铝合金在三种强化机制（固溶强化、加工硬化和沉淀硬化）的独立作用下，导热系数和强度的变化情况。加工硬化极大地提高了强度，对导热系数没有影响；固溶强化和沉淀强化由于引入了很多散射中心，使得导热系数有所降低。

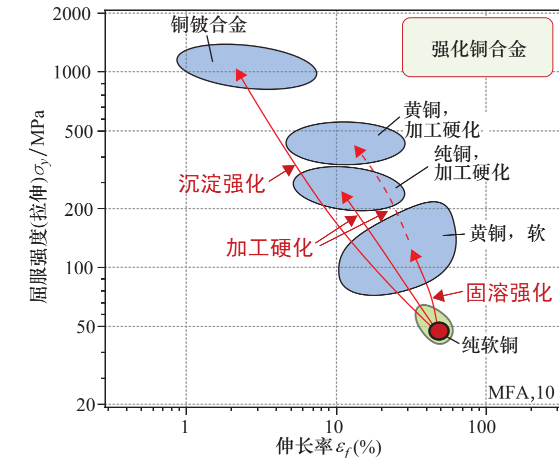


图 13.17 以铜合金为例阐述强化机制及随之发生的延性下降

（各种强化机制一般同时存在，且强度越高，延性（断裂时的延伸率）越差。）

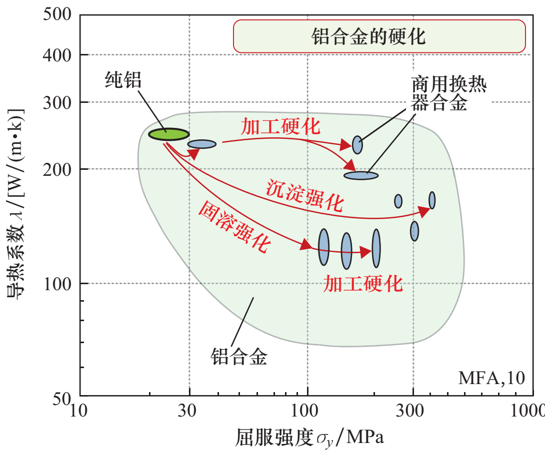


图 13.18 铝合金的导热系数与强度

许多电器（如高速电动机和电力传输器等）都要求所用材料既有好的导电性，又有很高的强度。对此，图 13.19 以铜为例作了详细说明。增加溶质可以提高强度，但分散的溶质原子也提高了电阻率。位错可提高强度（即所谓的加工硬化），但它们也会造成电子的分散，只是程度要比溶质小得多。沉淀相极大地提高了强度，与此同时导电性只是微降。因此，沉淀强化（低残余溶质）和加工硬化是强化导体最佳方法。

众多工艺中，热处理是调控钢的性能最为重要的工艺。图 13.20 描述了热处理对中碳钢的影响。钢加热到奥氏体相区时变成固溶体，能溶解所有的碳原子，然后水淬或油淬得到硬而脆的马氏体。马氏体的硬度很高但很脆，它的断裂韧度太低以至于不能用作结构材料。回火可降低材料的硬度和屈服强度，同时可恢复材料的韧性，恢复的程度依赖于回火温度和时间。通过热处理工艺的控制，我们可以获得所需要的性能。

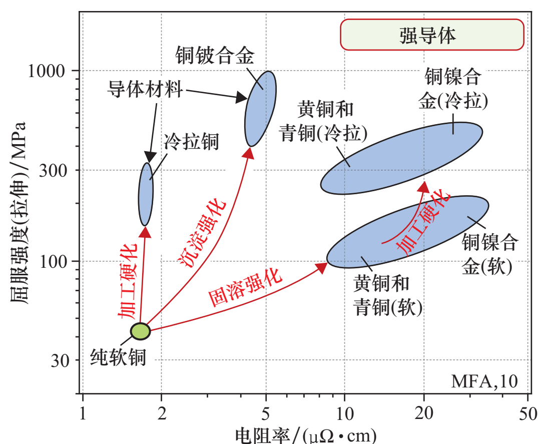


图 13.19　最佳的电缆材料应具有高强度和低电阻率（强化机制会提高电阻率。相比于固溶强化，加工硬化和沉淀强化造成的电阻率增加较少。）

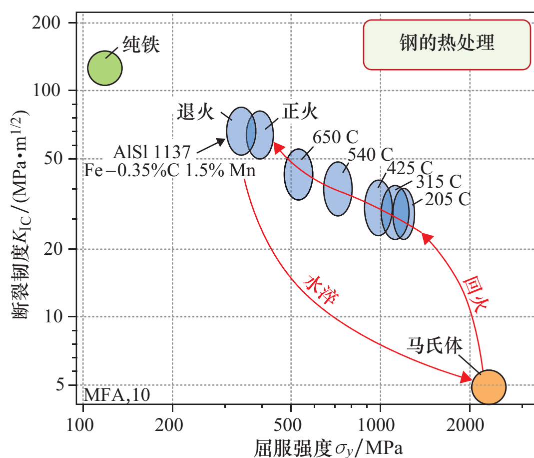


图 13.20　由热处理引起的碳素钢断裂韧度与屈服强度变化

由此可见，工艺对于材料性能的控制至关重要。通过选择不同的工艺，可以获得不同外形和性能的产品。

13.5　系统的工艺选择

13.5.1　选择策略

选择工艺的策略类似于选择材料的策略。图 13.21 给出了相应的步骤：解读、筛查、排序和文档查阅。

1. 解读

正如前面章节所介绍的那样，零件的功能决定了材料和形状的初始选择。这个选择会对工艺的选择施加约束。这种约束有两类。一类源自技术层面，如：该工艺能否胜任？另一类源自品质层面，如：该工艺是否能做得足够好？技术层面的约束通常兼顾材料和工艺，而质量层面的约束则是不产生缺陷的前提下，获得的精度、表面质量和性能。工艺选择的目标在于成本最小化。自由变量极大地受限于所选择的工艺本身

及它的参数（如温度、流动速率等）。表 13.2 对解读结果作了总结。

表 13.2 工艺要求的解读

功能	工艺需要做什么？（成形？连接？精饰？）
约束条件	必须满足什么技术层面的约束？（材料和形状的相容性）必须满足什么品质层面的约束？（精度、没有缺陷…）
目标	需要最大化或最小化什么？（成本？时间？品质？）
自由变量	工艺选择和工艺运行条件

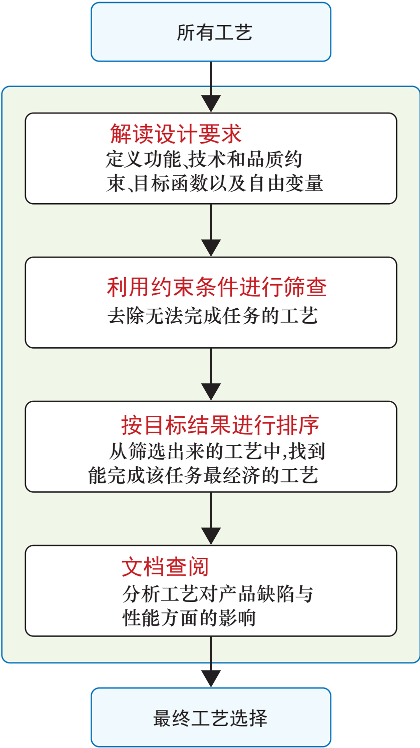


图 13.21 工艺选择过程的流程图，类似于材料选择过程

2. 筛查

筛查用于去除不能满足约束条件的工艺。工艺的部分属性可以简单地由数值范围来表示，如工艺所能处理的零件尺寸或质量、精度，或者工艺能够达到的表面平滑度。其他属性是非数值的，如可应用该工艺的材料清单。将“由镁制成，重约 3kg”这类需求与工艺属性进行简单对比，可去除不能加工镁或不能加工 3kg 以上零件的工艺。

3. 排序

正如前面所提到的，排序一般基于一个或多个目标进行，最显著的目标就是最小化成本。在特定要求的应用中，目标可能是最大化品质且无须考虑费用。通常情况下，目标都是在成本与品质二者之间进行权衡。

4. 文档查阅

筛查和排序步骤都无法对品质与生产力问题给予有效的处理，因而最好在文档查阅阶段通过查阅设计指南、实践指导、案例学习以及失效分析等文档来加以仔细思考。所有类型的工艺设备都有其最佳运行条件范围，在这个范围内设备的工况最好，生产出来的产品没有任何瑕疵。假如设备无法在这个窗口内进行工作，则会生产出有缺陷（如过孔隙度、破裂或者残余应力）的产品。这些缺陷会造成废品并降低生产力，一旦这些有缺陷的产品到了用户手里，则有可能造成过早破坏。因此，文档查阅是工艺选择的一个必要环节。

13.5.2 执行策略

前面已经说过，每一种工艺都有一组不同的属性。这些属性可以方便地使用简单矩阵和柱状图来呈现。这类图表为我们提供了筛查工具。这里所给出的图表都做了必要的简化，只显示了有限的工艺和属性。计算机实现使得我们可以对工艺与属性进行更为广泛的探索。

1. 材料—工艺相容性

图 13.22 显示了材料与工艺的相容性矩阵。图中，成形工艺位于最上方，相容的

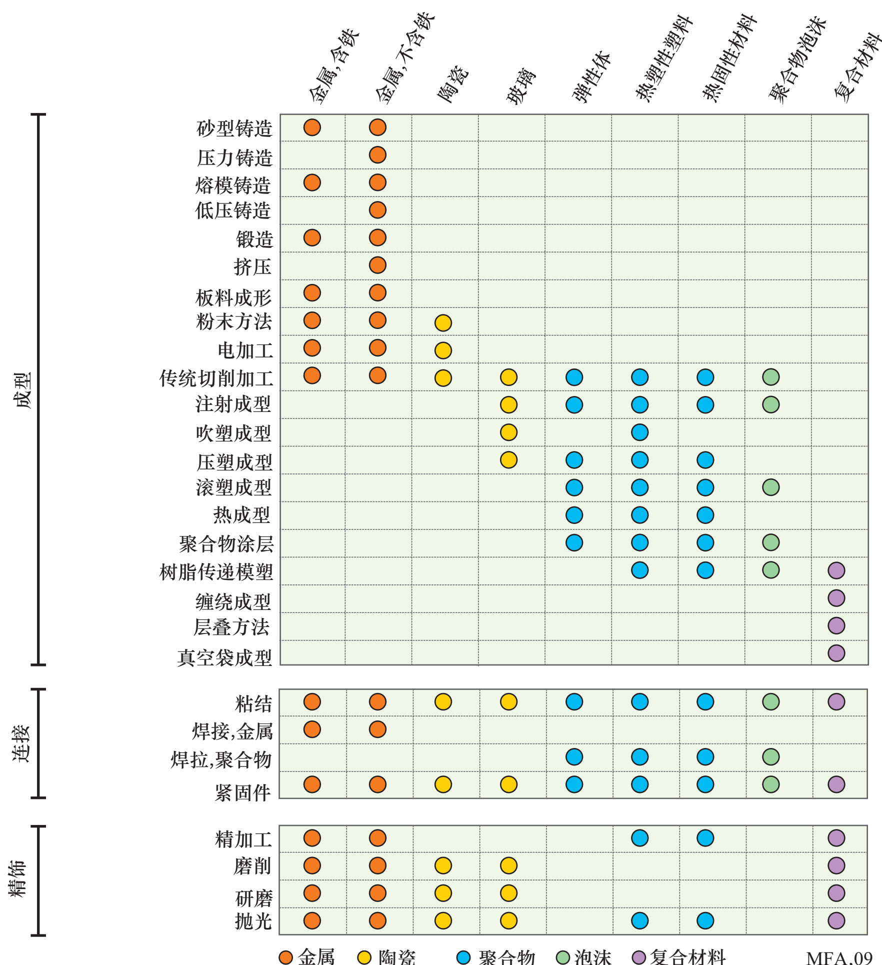


图 13.22 工艺—材料矩阵（彩色圆点表明两者相容。）

组合用不同颜色的点做了标记，不同颜色代表不同的材料系列。筛查过程很简单，根据指定材料从表中读取相容的工艺，或者指定工艺从表中读取相容的材料。这些点在矩阵图中沿对角线分布，说明每一类材料（如金属和聚合物等）都有其各自的工艺路线。有些区域是重叠的，比如粉末法可加工金属和陶瓷，模塑成型可以加工聚合物与玻璃。切削加工在用于改变零件形状时，几乎与所有的材料都相容。使用粘结剂和紧固件的连接工艺也具有广泛的用途，可与大部分材料相容，而焊接只对特定的材料适用。精饰工艺主要用于较硬的材料，特别是金属；聚合物一般采用模塑成型，除了装饰目的基本不作后续处理，稍后我们会解释其中的原因。

2. 工艺—形状相容性

形状是最难以描述的一种属性。很多工艺涉及工具或材料的旋转以及平移，因而要求我们考虑轴向对称、平移对称和截面均匀性等问题。车削可用于加工轴对称或圆形工件；挤压、拉深和轧制可加工棱柱形件，包括圆形和非圆形；板料成形工艺可加工平板件（冲压）或中凹件（拉深）。有些工艺能制造三维形状，其中又有一部分能够制造中空件。图 13.23 给出了这种分类策略。左侧的菱柱形件通常由轧制、挤压或拉拔制成，它们有着固有的特点，即沿长度方向可以连续成形。其他形状则无法实现这

一点，它们对应的零件都是间断的。我们将其生产工艺称为分批工艺。连续式工艺适用于长的棱柱形件，如铁路轨道或标准库存料（如管料、圆盘料和板料）。圆筒形轧辊适用于生产板料；型轧辊适用于生产复杂截面的产品；挤压是一种通用的连续式工艺。对于那些含内沟道和纵向特征（如肋和加强肋）的复杂菱柱形件，都可以采用挤压工艺一步成形。

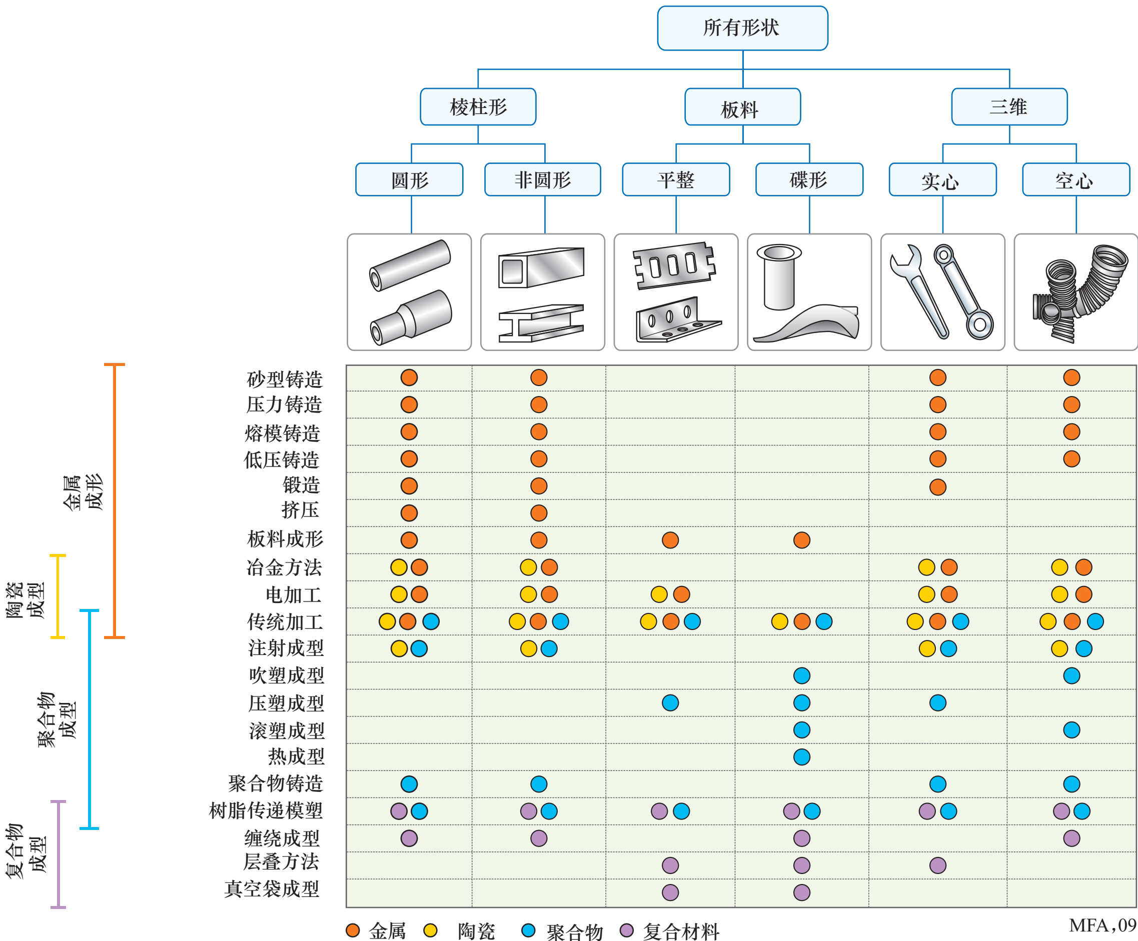


图 13.23 工艺—形状矩阵（关于材料相容性的信息位于最左侧。）

工艺—形状矩阵图描述了工艺与形状两者之间的联系。如果单一工艺无法实现我们所需的形状，我们可以结合二次工艺形成一个工艺链来添加额外的特征。铸造之后进行切削加工就是一个很典型的例子。但需要注意的是，每增加一步工艺，成本都会有所增加。

3. 成形工艺：质量和截面厚度

一种工艺能加工的工件尺寸是有极限的。图 13.24 给出了相应的极限，图中保留了代表材料相容性的颜色。当一种工艺可加工的材料种类不只一种时，会用多种颜色来表示。尺寸可由质量或体积来衡量，二者的范围都跨越很多数量级。但是，密度的变化倍率在 50 左右，因此不论是什么材质做的，尺寸大的东西如我们感觉的那样会重一些。大部分工艺对应的零件质量变化倍率在 1000 左右。极端情况下，该属性的差别

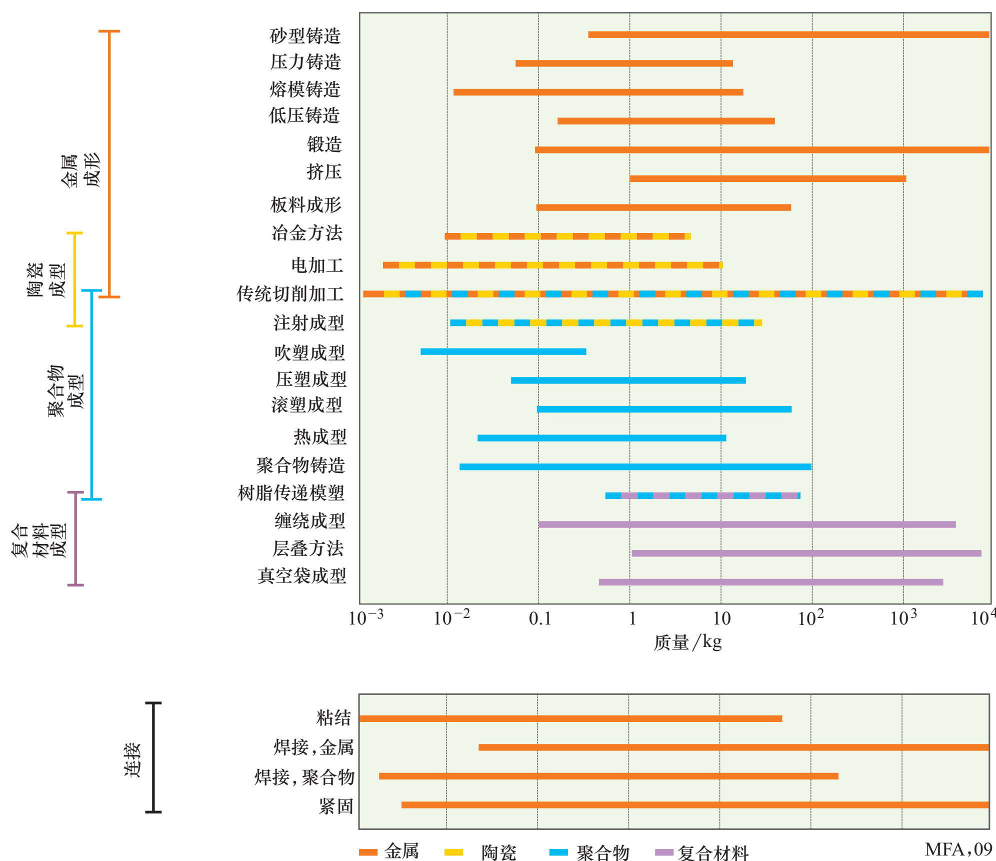


图 13.24　工艺—质量范围表（连接工艺的引入是为便于简单工艺链的探讨。）

最为明显。绝大部分零件的质量都在 0.1kg 到 10kg 之间，对应这个范围几乎任意工艺都适用。

图中每一条柱子描述了工艺能胜任的尺寸范围，每一条都可以向两侧的极限情况延伸。由于此时设备已不再是标配，因而会增加成本。因此，在进行筛查时，找到接近失败但仍可用的临界工艺非常重要。如有必要，可以考虑采用这些工艺。

图 13.25 给出了另外一张柱状图，描述了各种成形工艺可加工工件的截面厚度范围。该范围的下限，也就是最小截面厚度，是由工艺的物理极限所决定。下一节我们将讲述这些极限的由来。

4. 尺寸与截面厚度的物理极限

铸造和模塑成型都依赖材料在液态或半液态状态下的流动。流动物理学决定了截面厚度的下限。黏度和表面张力会阻碍液体流过狭小的通道，由于截面积小而表面积大造成的热量流失会使得材料发生冷却，使得材料的黏度在通道充满前会有所增大（见图 13.26）。纯金属的凝固温度是固定的，黏度逐步提高。合金的凝固发生在一个温度区间内，即众所周知的凝固区，此时部分合金处于液态，部分合金处于固态。这个温度区间的变化范围可以从几度到几百度，因此铸造时金属的流动取决于合金成分。总的来说，高压压铸和模塑方法可以制造截面非常薄的零件，但设备花费比较高。而且，流速越快则紊流越多，使得缩孔越多且损害模具。

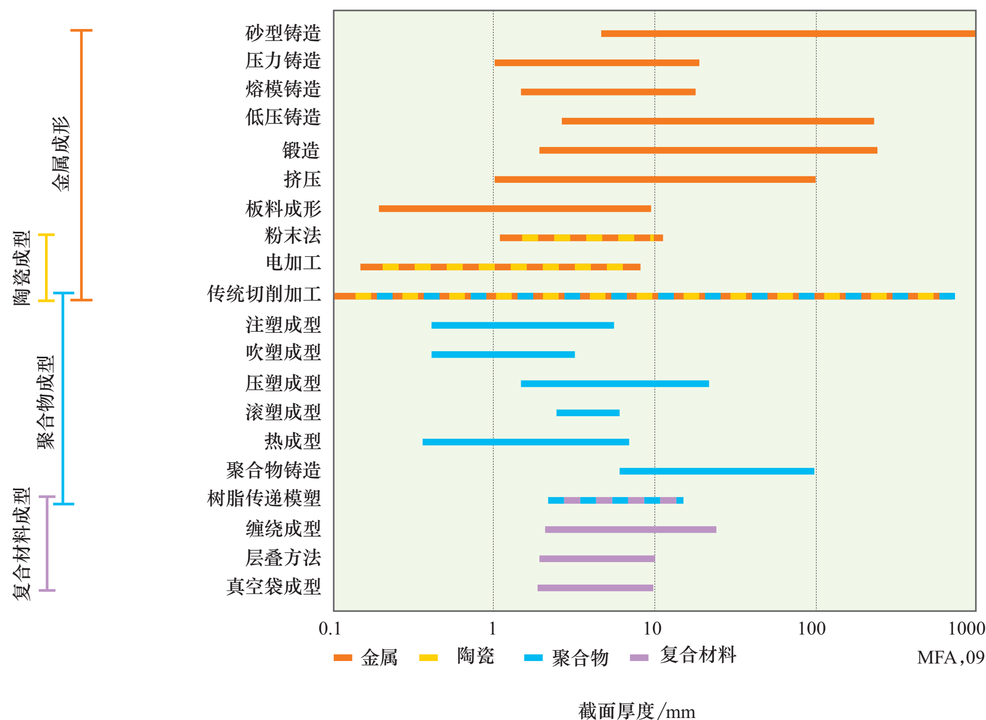


图 13.25 工艺—截面厚度图表图

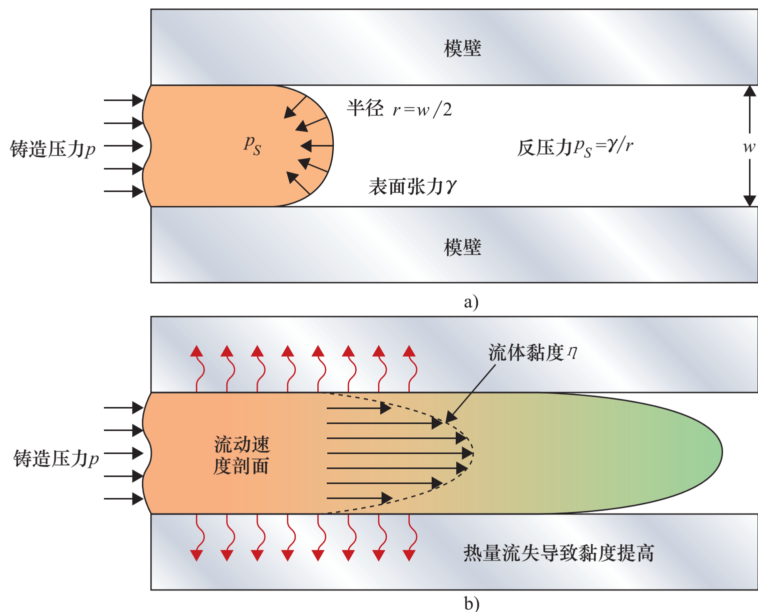


图 13.26 液态金属或聚合物在薄截面的流动受表面张力（见图 a）和黏性力（见图 b）的阻碍（模具中热量的流失会导致黏度提高，可能导致过早固化。）

铸造和模塑成型工艺对应的尺寸与截面厚度的上限取决于收缩问题。铸造或模塑成型时，外层材料首先冷却和凝固，形成刚性表层。随着内部材料的不断凝固，体积变化会导致工件的扭曲或表层的开裂，甚至造成内部孔穴。这类问题在截面发生变化

的部位最为严重，因为截面约束会产生拉应力，从而造成热裂。不同的成分对热裂有不同的敏感性，相关内容我们将在另外一个案例中予以介绍。

窄通道内的材料流动

某复杂铝铸件的铸造模具，内含一些通道特征，宽度仅为 10μm。试想一个大气压的超压（0.1MPa）是否足以克服表面张力，使这些通道能被填满？液态铝的表面张力的值为 $1.1\mathrm{J/m^2}$。

答：克服表面张力，迫使金属流入密度为 $2x$ 的平行通道所需的压力 $p=\gamma/x$。因此，在一个大气压的超压条件下，能被填满的最窄通道是

$$2x=\frac{2\gamma}{p}=\frac{2.2}{0.1\times10^{6}}\times2.2\times10^{-5}=22\mu\mathrm{m}$$

因此，一个大气压的超压不足以使得通道填满。如果提供 5 个大气压的超压的话，则相对容易得多。

金属的变形工艺（如热轧、冷轧、锻造和挤压等）也涉及材料的流动。可进行锻造、轧制或挤压的零件最小截面厚度取决于材料的塑性流动，类似于铸造中材料的黏度对铸件最小截面厚度的限制。截面越薄，所需的轧制力或锻造力越大。图 13.27 阐述了问题的根源。摩擦改变了模具接触面和轧辊下方区域的压力分布。当润滑很好时（见图 13.27a），载荷接近单轴状态，材料在屈服应力 σ_y 的作用下进行流动。当存在摩擦力时（见图 13.27b），材料在与模具的交界面处发生剪切变形。由

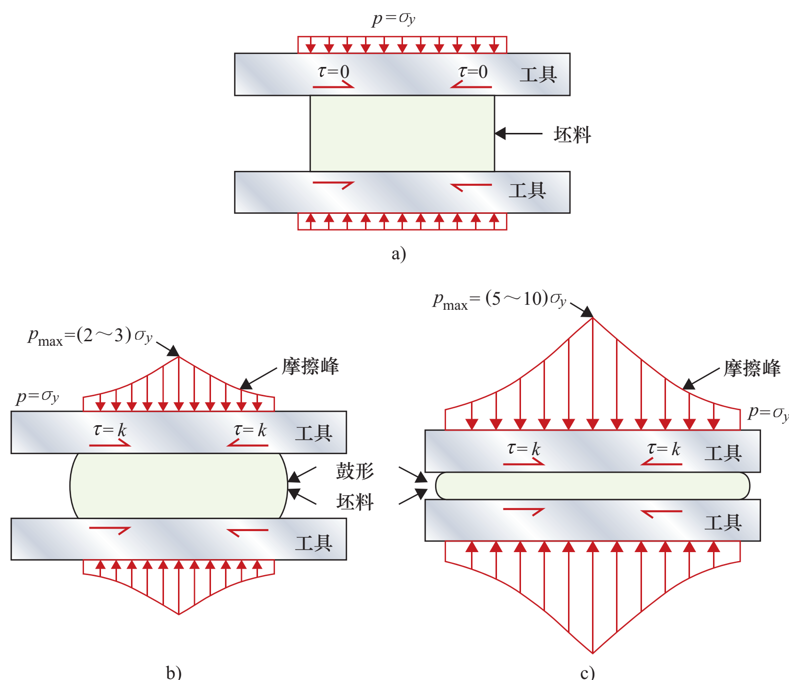


图 13.27 摩擦和宽厚比对锻造的影响

a）摩擦力极低情况下的单轴压缩 b）黏着摩擦条件下，接触压力会上升进而形成摩擦峰

c）宽厚比越大，压力上升越多，最终对可获得的最小零件厚度会有所限制

于摩擦力阻碍了材料的横向扩展，导致压力呈斜坡上升，形成“摩擦峰”。压力分布曲线包络的面积对应总的成形载荷，由此可见摩擦增加了所需的载荷。横截面的宽厚比越大，屈服所需的最大压力越大（见图 13.27c）。这一点充分说明了摩擦对横截面厚度最根本的限制。非常薄的截面易与模具黏在一起，因而即便有很大的压力也不会发生屈服。

粉末挤压的高宽比限制

假如模壁上的摩擦系数 $\mu=0.5$，那么在图 13.28 所示位置由于模壁摩擦导致的压力下降值有多大？

答：图中厚度为 dx 的绿色带所受到的摩擦力为 $2\pi r\mu p\mathrm{d}x$，其中 p 是与模具表面距离 x 处的压力值。将摩擦力除以粉末团的横截面积 πr^2，可得到压力下降值

$$\mathrm{d}p=-\frac{2\mu p\,\mathrm{d}x}{r}$$

假定 $x=0$ 时 $p=p_o$，$x=x$ 时 $p=p(x)$。对上式进行积分可得：

$$p(x)=p_o\exp\left(-\frac{2\mu x}{r}\right)$$

取摩擦系数 $\mu=0.5$，当压力降为初始设定值的一半时，深度与半径的比值为：

$$\frac{x}{r}=-\frac{1}{2\mu}\ln\left(\frac{1}{2}\right)=0.69$$

因此，需要对模具进行润滑以减少摩擦系数。

摩擦也会限制粉末成型工艺的宽厚比。由于外部施加的压力会被模壁处的摩擦力部分抵消（见图 13.28），因而对于宽厚比太大的情况，剩余的压力会不足以使产品中心处的粉末粘合。

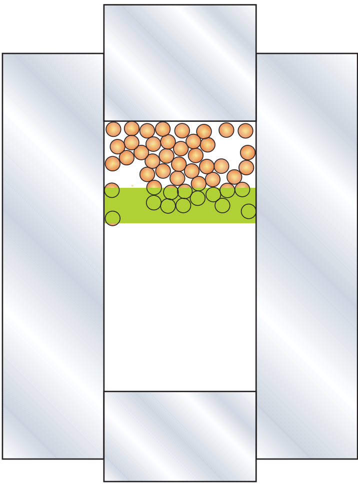


图 13.28 粉末锻造的高宽比受模壁摩擦的限制
（距离表面越远处的压实压力会在模壁摩擦力的影响下呈指数形式下降。）

5. 公差和表面粗糙度

尺寸精度和表面质量代表了零件品质的两个方面。它们可以用公差和表面粗糙度 R 来衡量。一旦零件的尺寸确定，表面质量也会确定，但不一定是全部表面。当表面为接触面（如法兰面）时，表面质量尤为重要，配合后需确保密封或保证滑块能在凹槽中滑动。此外，表面质量对于零件的抗疲劳断裂能力和外形美观也极其重要。尺寸 r 的公差 T 可表示为 $r=100\pm0.1\mathrm{mm}$，也可以表示为 $=50^{+0.01}_{-0.001}\mathrm{mm}$。后者的表示方法代表尺寸向上偏差的自由度比向下偏差的自由度要来得大。表面粗糙度一般以上限值来表示，如 $R<100\mu\mathrm{m}$。表 13.3 给出了各类产品的代表性表面粗糙度值，同时给出了获取相应表面粗糙度所采用的典型工艺。

表 13.3　表面粗糙度等级

表面粗糙度/μm	工艺	典型应用
$R=0.01$	研磨	镜子
$R=0.1$	精密磨削或研磨	高质量轴承
$R=0.2\sim0.5$	精密磨削	筒形件、活塞、凸轮、轴承
$R=0.5\sim2$	精密机加工	齿轮，普通机械零件
$R=2\sim10$	切削加工	轻载轴承，非关键零件
$R=3\sim100$	未精加工铸件	非承重面

表面粗糙度是对表面不平整度的一种衡量（见图 13.29），它被定义为表面轮廓峰值的均方根：

$$R^2 = \frac{1}{L}\int_0^L \gamma^2(x)\,\mathrm{d}x \tag{13.1}$$

表面粗糙度的一种测量方法是将一支轻质触笔在表面上沿 X 方向拖曳，同时记录下垂直方向的轮廓 $\gamma(x)$。整个动作就像播放唱片一样。光学轮廓测定法利用激光干涉来勘查表面的不平整度，这种方法更为快速且精确。公差 T 显然比 $2R$ 要来得大。事实上，R 是表面粗糙度峰值的均方根，因此公差下限的绝对值接近 $5R$。实际工艺的公差范围在 $10R\sim1000R$ 之间。

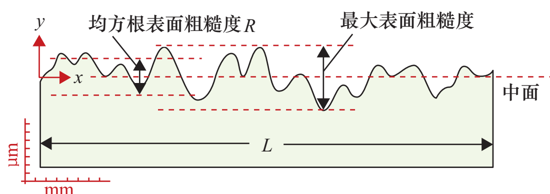


图 13.29　表面的截面，用以显示它的不平整度（垂直方向做了放大处理）（不平整度采用均方根表面粗糙度 R 来衡量。）

图 13.30 和图 13.31 显示了不同工艺所能获得的公差与表面粗糙度的典型范围，图中保留了针对不同材料种类的颜色标识。精饰工艺的数据位于成形工艺的下方。砂型铸造的零件表面粗糙，而用金属模铸造的零件表面则要光滑得多。然而，任何金属成形工艺所获得的公差都无法优于 $T=0.1\text{mm}$，表面粗糙度也无法优于 $R=0.5\mu\text{m}$。切削加工可以获得更高的精度和表面质量，因而常被用于和铸造或变形工艺形成一个工艺链，以求获得所需的公差或表面质量。金属和陶瓷可以通过表面研磨来实现高精度和平滑度。一块大型望远镜反射器的公差接近 5μm，1m 尺寸内的表面粗糙度约为公差的 1/100。但是，高的精度和表面质量会增加成本。当两者都有严格要求时，所需的成本将会呈指数级增长。显然，过定义精度和表面质量的代价是非常昂贵的。

聚合物模塑件的表面质量与其成型模具的表面质量相当，因而表面非常光滑，无须再用切削加工来改善表面质量。要想使得公差小于±0.2mm 基本不太可能，其原因在于模塑成型时残留的内应力会造成扭曲，且聚合物在服役过程中会发生蠕变。

6. 连接：材料的相容性

金属、聚合物、陶瓷和玻璃的连接工艺是不同的。一种粘结剂只能用于部分材料，对于其他的材料则不起作用。聚合物的焊接方法也不同于金属的焊接。陶瓷无法焊接，通常采用扩散连接或釉结合工艺。图 13.22 给出的工艺—材料矩阵包含了四类连接工艺。

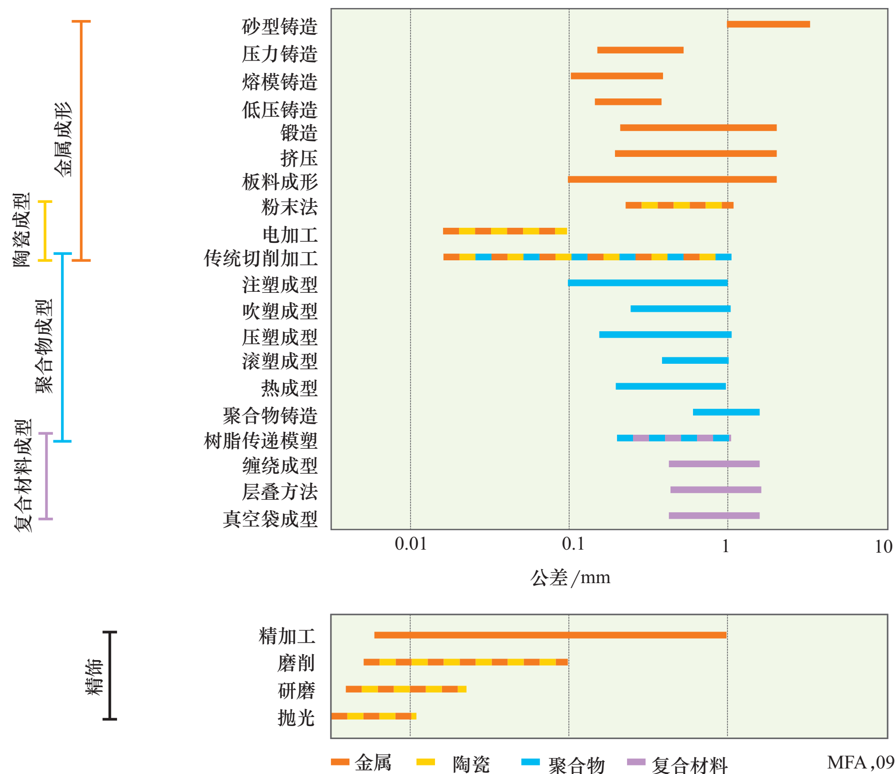


图 13.30 工艺—公差图表（精饰工艺的引入是为便于简单工艺链的探讨。）

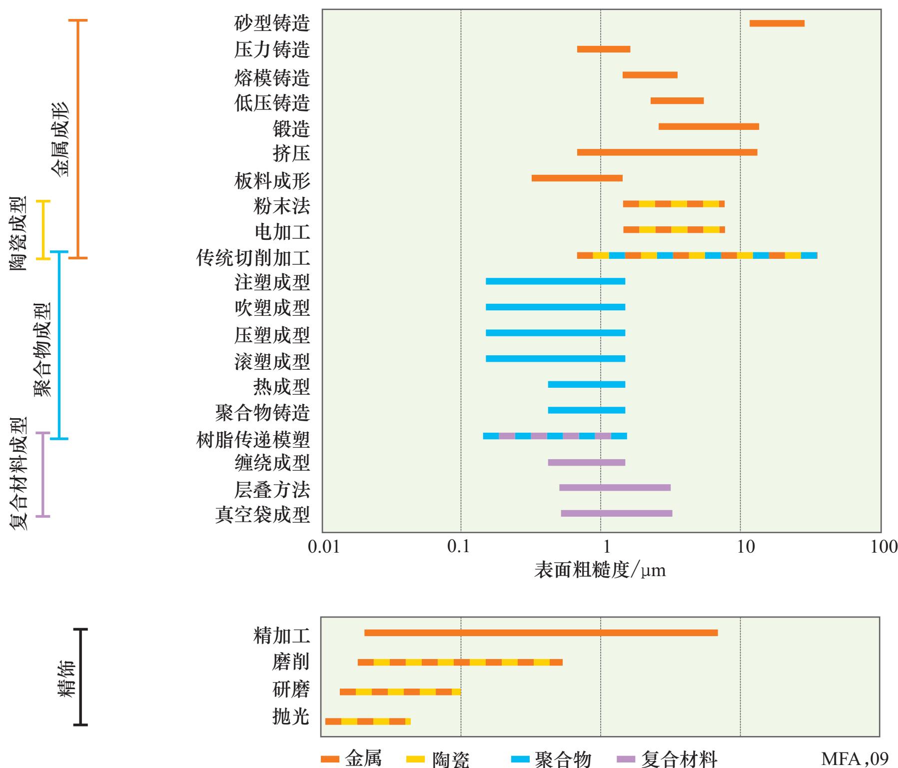


图 13.31 工艺—表面粗糙度图表（精饰工艺的引入是为便于简单工艺链的探讨。）

当连接两种不同的材料时，连接工艺必须对二者都相容。粘结剂和紧固件可用于连接两种不同的材料，而很多焊接工艺则无法实现。如果两种不同的金属材料是以电接触的方式连接，当接头处于潮湿状态时，此处会发生电偶腐蚀。对此，可以在接触面之间嵌入一个绝缘层来避免电偶腐蚀的发生。当温度变化时，连接处的热膨胀性能差异会导致内应力的产生，可能引起扭曲或破坏。确认连接不同材料的最佳方法是文档查阅阶段的工作内容之一。

7. 连接头几何形状与承载方式

连接头的几何形状以及承载方式（见图 13.32）会影响工艺的选择。粘接连接头抗剪能力好但抗剥能力差（试想下剥胶带过程）；粘结剂需要很大的作业面积，所以搭接接头可正常工作，但对接接头则无法正常工作。铆钉和 U 形钉也能较好承受搭接处的剪应力，但承受拉应力的能力有限。焊接和螺纹紧固件的适应性更好，即便如此，几何形状和承载方式与工艺选择的匹配同样非常重要。

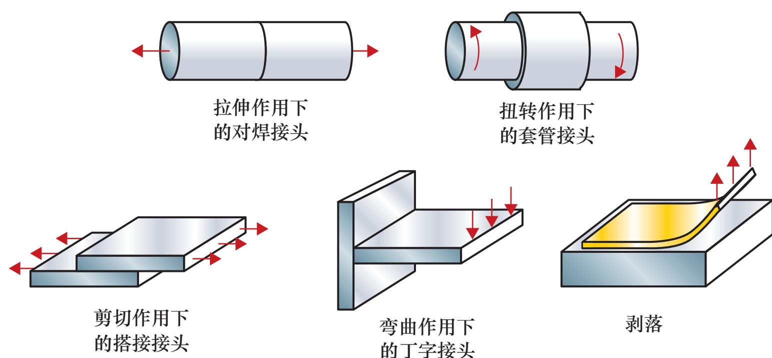


图 13.32 连接头的几何形状和承载模式

8. 连接头的辅助功能

连接头可用于密封，阻止气体或液体的进入。此外，还可能要求连接头导热、导电或绝热、绝电，或能够在高温下应用。它或许会永久存在，抑或是在产品生命周期终结的时候被拆下来再循环使用或再利用。螺纹紧固件和粘结剂连接可借助溶剂或加热来完成拆卸。

9. 表面处理：材料的相容性

材料与表面处理工艺的相容性位于图 13.22 所示矩阵的底部。如前所述，表面精饰对于金属很重要，而对聚合物则不然。

10. 表面处理的目的

所有的表面处理都会增加成本，但同时附加值也会很高。表 13.4 介绍了表面处理所能提供的各种功能。部分是起保护作用，部分用于提高性能，还有部分起美观作用。对于零件，表面的保护可以延长它的使用寿命，并加大维修时间间隔。刀具涂层有助于加快切削速度，提高生产率。表面强化工艺使得用便宜材料来替代基体合金成为可能。例如，昂贵的合金钢可以用表面渗碳或带有 TiN 涂层的普通碳钢来替代。

表 13.4 表面处理所能提供的功能

耐腐蚀，水相环境	绝热性	摩擦控制	装饰
耐腐蚀，气体环境	绝电性	抗疲劳	色彩
耐磨性	磁响应	导热性	反射率

11. 二次相容性

某些表面处理（如阳极氧化）不会改变零件的尺寸、精度和表面粗糙度。电沉积涂层和气相沉积涂层会稍稍改变零件的尺寸，但仍能留有光滑的表面。聚合物粉末喷涂生成了一层相对厚而光滑的涂层，而其他工艺（如焊缝熔敷）会在零件表面形成厚而粗糙的一层，需要进行再次精饰。“目视”沉积工艺只在定向的表面产生涂层，其他表面不会有涂层覆盖。其他的工艺结合“泳透力”可在平面、曲面和凹角表面形成同样好的涂层。很多表面处理工艺需要加热，因而只适用于可以承受温升的材料。有些喷涂工艺是在冷态下进行，但很多要求在150℃环境下进行烘烤。利用渗碳或渗氮来获取表面硬化层的热处理工艺，需要将温度加热到800℃并保温一段时间，因而会改变基质材料的微观组织。

13.6 排序：工艺成本

零件的部分成本来自于制造用的材料，剩余的则是制造成本，即成形、连接和精饰过程所产生的费用。在进行细节描述之前，我们先来看一下四个设计者应该知道的可以使成本最小化的常识性规定。具体如下：

1. 标准化

如果想要的零件已经有人生产，那么采购会比自己制造来得便宜。如果没有供应商可以提供，那么相比于非标准形状以及特殊形状的铸件或锻件，基于标准库存（板、棒和管）的设计会使得成本低一些。尽量使用标准材料，且品种越少越好，这样可以减少存货成本和制造所需的工具，并且有助于再循环使用。

2. 简单化

如果需要对零件进行切削加工，那么它必须被装夹。成本会随着装夹调整次数的增加而不断上升，特别是在需要使用特殊工具的时候尤其明显。如果零件需要进行焊接，那么焊工的焊具必须能触碰到所要焊接的区域，且能看清焊接的情况。如果利用铸造、模塑成型或锻造工艺来制造零件，那么请记住：为了使液体流入狭窄的通道，我们需要提供很大的压力；此外，凹角形状会导致模具设计非常复杂。当设计零件的时候，可以思考一下：这样设计是否会难以处理？设计上的微调是否可以对此有所改进？

3. 使零件易于装配

装配需要时间，时间就是金钱。如果间接费分摊率为每小时60美元，那么每一分钟装配时间的成本会增加额外的1美元。面向装配的设计利用一系列常识性的标准和规则来设法降低其成本。简单地说，可以分为以下三点：

1）最少化零件数量。

2）所设计的零件在装配时能自动对准。

3）使用快速的连接方法，卡扣和点焊比螺纹紧固件或粘结剂通常要快一些。

4. 减少不必要的性能需求

好的性能源于成本的投入。高强度金属是通过添加昂贵的合金元素而得到的；高性能聚合物在化学组成上更为复杂；高性能陶瓷在其制造过程中需要严格的质量控制。所有这些都增加了材料成本。此外，高强度材料很难制造。成形所需的力很大，模具

磨损严重，且高强度材料的延展性不足以至于变形很困难甚至无法变形。因此，我们必须寻找新的工艺路线，如采用熔模铸造或粉末成形来替代传统的铸造工艺和切削加工，使用更为昂贵的能在高温和高压环境下工作的设备等。高强度材料的高性能是由高昂的成本造就，成本不仅仅来自于材料，还来自于工艺。至于公差和表面粗糙度，成本会随精度和表面质量要求的增加呈指数级别的上升。很明显，性能源于金钱，永远不要过度定义不必要的性能需求。

接下来，我们来看一下哪些方面会影响工艺的成本。

5. 选择的经济效益标准

如果你要削一支铅笔，你可以用小刀。如果你要削一千支铅笔，有可能会买一个电动卷笔刀。但如果是一百万支呢，你可能希望配备一套能自动供料、咬入和削笔的系统。为处理不同长度和直径的铅笔，你会再进一步设计一套带有传感器的微机控制系统，实现铅笔尺寸和削笔力量等的测量，最终形成可识别并适用于不同尺寸铅笔的智能系统。由此可见，工艺的选择取决于你要削的铅笔数量，也就是批量大小。最好的选择对应削每支铅笔的成本应最小。

图 13.33 是削一支铅笔的成本与批量大小的关系。一把小刀成本不高，但加工缓慢，所以劳动力成本很高。其他方法的投资支出逐级增加，但完成工作更快，降低了劳动力成本。图中曲线对应投资支出与生产效率之间的一种均衡。这里，最好的选择对应最底下的曲线。如果铅笔的数量在 100 以内，那么刀具是最好的选择；数量在 10^2 到10^4 之间，则使用电动卷笔刀；数量在 10^4 到 10^6 之间，则使用自动化系统。每一种工艺都有相应的经济批量。

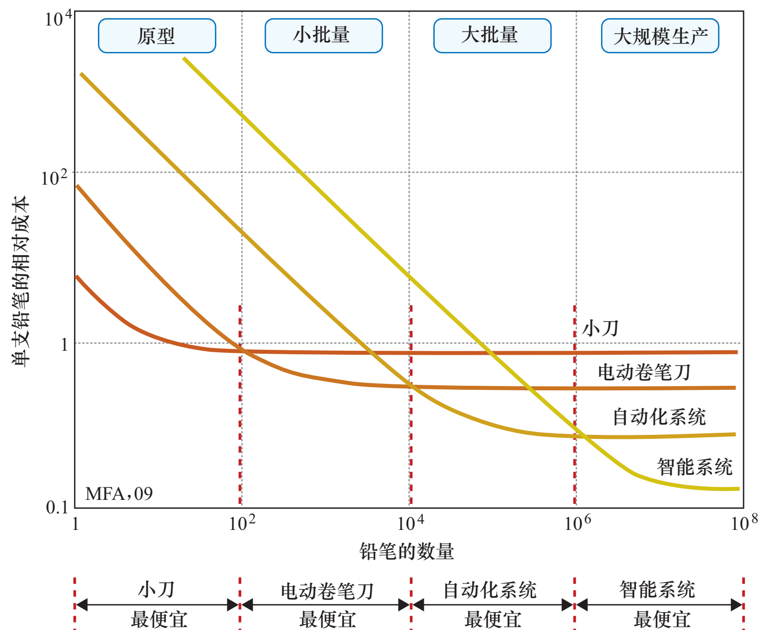


图 13.33　四种不同工艺削铅笔的单支铅笔成本与批量大小关系图（所有曲线都源自式 13.5。）

6. 经济批量大小

工艺成本取决于大量的独立变量，但并不是所有变量都能被加以控制。在下一节我们将描述一种成本模型，如果能找到替代近似方法的话，那将是令人兴奋的。经济

批量或许能做到这一点。图 13.34 列出了本章提及的工艺所对应的经济批量大小。工艺的经济批量大小一般被定义为一个范围（如 B1 到 B2）。范围的确定依赖于经验，取决于产量在此范围内时，该工艺的成本是否有竞争力。确定的过程类似于铅笔数量在 10^2 到 10^4 之间时，选用电动削笔刀那样。经济批量大小是工艺时常被提及的一种属性。一种简单地将经济效益引入工艺选择的做法是，将候选工艺按经济批量大小进行排序，然后将那些在你所想要的产量范围内具有成本竞争力的工艺保留下来。但是，请记住：试图将许多变量合成一体而不损失变量的特性，是基本不可能做到的。成本模型会让我们对此有深刻的认识。

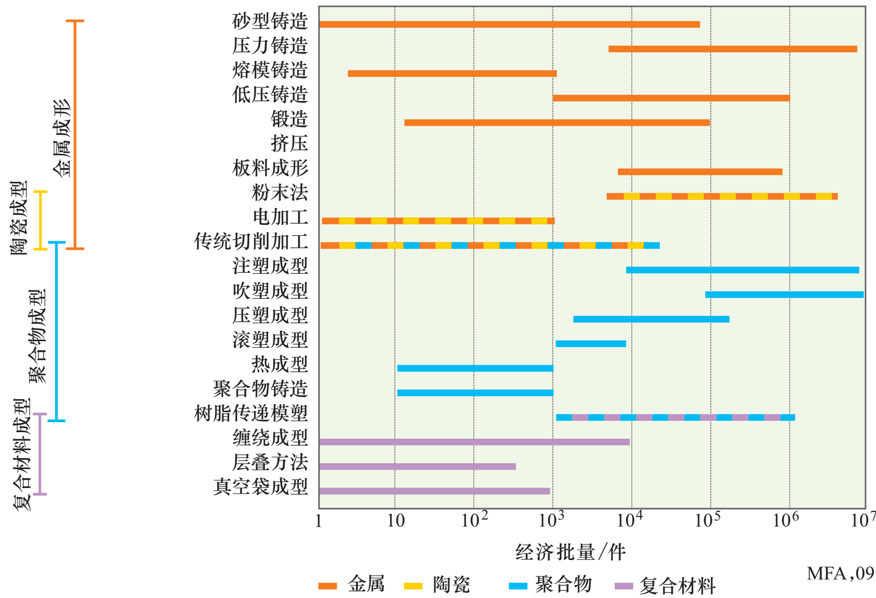


图 13.34 经济批量大小图表

建立成本模型的过程如下：

如图 13.35 所示，零件的制造需要消耗很多资源，每一项都有相应的成本。最终的成本是所消耗的资源成本的总和（见表 13.5）。因此，生产一个质量为 m 的零件需要承担材料成本 C_m($/kg) 和原材料成本。此外，还有专用工具的成本 C_t($) 以及相关的固定设备的成本 C_c($)。时间成本可由间接费分摊率 $\dot{C}_{oh}$($/h) 来体现，间接费用包括人力成本、管理费以及常规工厂成本。对于能源密集型生产过程，能源成本有时会被计入单个工步，但通常会被作为间接费用的一部分，在间接费分摊率 $\dot{C}_{oh}$ 中加以考虑。最后，研发、版税或牌照费等信息成本，会按单位时间成本的方式

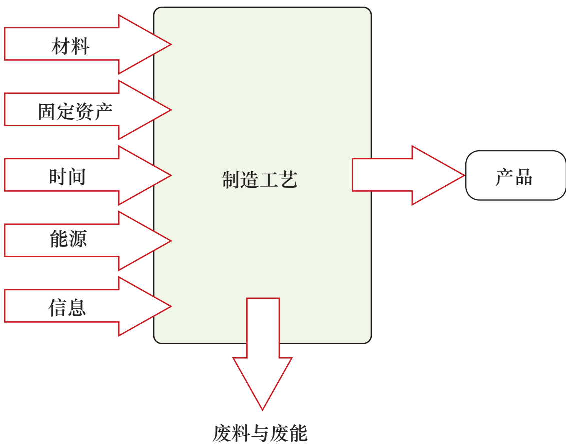


图 13.35 成本模型的输入参数

计入间接费用。

表 13.5　符号、定义和单位

资源	符号	单位
材料：包括消耗品	C_m	\$/kg
固定资产：工具成本	C_t	\$
设备成本	C_c	\$
时间：间接费分摊率，包括劳动力、管理费，租金……	$\dot{C}_{oh}$	\$/h
能源：能源成本	$\dot{C}_e$	\$/h
信息：研发或专利支出	$\dot{C}_i$	\$/年

现在以制造质量为 m kg 的零件（输出单元）为例，该零件由价格为 C_m \$/kg 的材料制成。单件成本的首要组成部分是材料成本 mC_m，需考虑放大因子 $1/(1-f)$。其中，f 是废料的分数，即浇口、冒口、切削或废弃物等占原材料的比例。

$$C_1=\frac{mC_m}{(1-f)} \tag{13.2}$$

模具和夹具等工具的费用统称为专用成本 C_t，会被分配到单个零件的生产运行中，在 n 次生产运行中加以核销。工具会出现磨损，一旦生产运行持续很长时间，则工具的替换不可避免。因此，单件产品的工具成本为：

$$C_2=\frac{C_t}{n}\left[\mathrm{Int}\left(\frac{n}{n_t}+0.51\right)\right] \tag{13.3}$$

式中，n_t 是一套工具在其生命周期内可生产的零件数量；Int 是取整函数。当生产批量 n 超过 n_t 时，每隔 n_t 的生产批量中括号内这一项的值就会有所增大，以此体现工具费用的增加。

相比之下，设备的投资成本 C_c 很少是专用的。对于一台设备（如粉末成型机），通过安装不同的模具，可用来生产不同的零件。通常，我们将非专用设备的投资成本或租借成本，按其资本注销年限 t_{wo}（比如，五年）转为间接费用计入成本中。C_c/t_{wo} 的值即为设备连续使用过程中每小时的费用。一般来说，设备很少会连续使用，因而我们在此基础上除以负载系数 L 来加以修正。负载系数 L 对应设备的有效生产时间比例。此时，单件产品的固定资产成本为：

$$C_3=\frac{1}{\dot{n}}\left(\frac{C_c}{Lt_{wo}}\right) \tag{13.4}$$

最后，我们来看一下间接费分摊率 $\dot{C}_{oh}$。如果将其除以单位时间生产率 $\dot{n}$，即可得到单件产品的间接成本：

$$C_4=\frac{\dot{C}_{oh}}{\dot{n}} \tag{13.5}$$

至此，单件产品成形所需的总成本由上述四项组成，公式如下：

$$C=\frac{mC_m}{(1-f)}+\frac{C_t}{n}\left[\mathrm{Int}\left(\frac{n}{n_t}+0.51\right)\right]+\frac{1}{\dot{n}}\left(\frac{C_c}{Lt_{wo}}+\dot{C}_{oh}\right) \tag{13.6}$$

由上述公式可知，成本有三个基本组成部分：单件的材料费用，独立于批量大小和生产率；单件的专属费用，随生产量倒数（$1/n$）的变化而变化；单件的总间接费

用，随生产率倒数（$1/\dot{n}$）的变化而变化。该公式针对每一种工艺，给出了生产批量与成本的曲线关系，如同图 13.33 中所给出的曲线关系。

在本书第 14 章中，我们将借助案例来详细阐述模型的使用方法。

式（13.6）是成本建模的第一步。若加深设计、工艺和成本之间相互作用的理解，成本模型可以拥有更强大的预测能力。设备的投资成本取决于生产批量和自动化程度。工具成本和生产率取决于零件的复杂程度。这些以及其他的依赖关系都可以通过理论、经验公式或查表来获得，将其引入成本模型中可提高工艺竞争性排序的分辨率。若想了解更为深入的分析，读者可参阅本章末尾处的“扩展阅读”。

13.7 计算机辅助工艺选择

如果全部工艺属性都被存储在有着良好用户界面的数据库中，那么选择图表就可以很容易的创建，选择框的操控也会有很大的自由度。本书前面章节中提到的 CES 平台，就是这样一个系统。数据库中存有很多记录，每条记录描述了一种工艺所具有的属性。本章实例给出了注射成型工艺所记录内容的一部分。原理图阐明了这种工艺的工作原理，关键的地方添加了小段文字加以解释。之后是属性列表，包括该工艺可以制造的形状、与形状和物理特性相关的属性以及那些描述经济参数的属性。最后是包含设计指导、技术说明和典型应用的简明文档。数值属性以变化区间的形式存储，表明该工艺可胜任的范围。每一条记录都与其相容的材料记录相关联。由此，材料选择可作为筛选标准用于工艺的选择。使用方式如同图 13.22 所示的材料相容性矩阵，但分辨率要高得多。通过以下两个步骤，我们可以获得一份精练的候选工艺清单，即：1）筛选出能满足设计要求的工艺；2）基于经济标准对选出的工艺进行排序。

实例：注射成型

1. 工艺

该工艺被广泛应用于热塑性材料的成型。图 13.36 是一台往复式螺杆注塑机。聚合物颗粒被送入螺旋腔，并在这里加热、混合以及软化到黏稠度与生面团类似，接着在压力作用下通过一个或几个通道（浇口）进入模具。随后，聚合物在压力下固化，零件成型后被顶出。

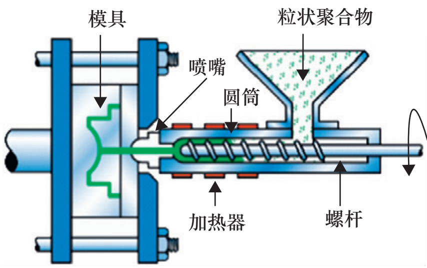


图 13.36 往复式螺杆注塑机

热塑性材料、热固性材料以及弹性体都可进行注射成型。共注塑成型可用于成型不同材料、颜色和特点的零件。发泡注射成型工艺常用于大型模塑零件的制造，通过使用惰性气体或化学发泡剂来获得表面是实体、内部是多孔结构的零件。

2. 形状

圆截面 √

非圆截面 √

三维实体	√
三维中空件	√

3. 物理属性

质量区间	0.01～25kg
截面厚度区间	0.4～6.3mm
公差	0.2～1mm
表面粗糙度	0.2～1.6μm
表面光洁程度（A＝非常光滑）	A

4. 经济属性

经济批量大小（件）	$10^4 \sim 10^6$

5. 成本模型

投资成本	$3\times10^4 \sim 7\times10^5$ \$
材料利用率	0.6～0.9
生产率（件）	60～1000/h
工具成本	3000～30000 \$
工具寿命（件）	$10^4 \sim 10^6$

说明

- 设计指导　注射成型工艺是大批量生产尺寸小、外形复杂且精度要求高的聚合物零件的最佳方法。所得到的零件表面质量好；纹理和图案可以很容易地利用模具做出改变；重复性不错。装饰性标签可直接在工件表面成型。唯一需要做的精饰操作就是去除浇口。
- 技术说明　大多数热塑性材料可以采用注射成型，但对于具有高熔点的材料（如 PTFE），成型是比较困难的。假如填充载荷不大，则热塑性基复合材料（短纤维或颗粒填充增强复合材料）可以成型。设计中，应避免截面的变化过大。小凹角或复杂形状可以成型，但脱模倒角、螺纹和嵌入物等特征的引入会造成模具成本的增加。
- 典型应用　房屋、容器、封盖、把手、工具柄、管道配件、透镜和玩具等。

为了能以经济标准来排序，CES 软件中嵌入了本章 13.6 节提及的成本模型。记录中包含投资成本（C_c）和工具成本（C_t）的大概范围，以及生产率（$\dot{n}$）的数据。式(13.6)中的数据未在记录中给出，因为这些并非工艺本身的属性，而是与设计、材料或者制造所在工厂的经济体制及场所等相关。软件使用者必须提供这些信息，可以通过对话框很便利地录入。输出结果类似图 13.33 所示的成本–批量曲线。

更多关于计算机辅助选择的内容可查阅“扩展阅读”中 Granta Design（2010）一文。

13.8 本章小结

对设计工程师来说，有大量的成形、连接和精饰工艺可供选择。每一种工艺都有各自不同的特点，这些特点的组合使之能将某种特定材料加工成一定形状，但是对其

他情况却不适用。面对这种选择，设计者在过去通常依赖于专业知识或惯例。因此，不仅难以创新，也很难适应当前的设计方法。本章讲述的系统方法为此提供了解决方案。它可以确保潜在的有效工艺不会被忽视，并能指导使用者快速找到可用于加工所需产品的工艺。

这个方法与材料选择的方法相似，可以使用工艺选择矩阵和图表来实现。零件的设计决定了某一已知的工艺属性组合。这些设计要求会被画在图表中，用以鉴别可能的工艺子集。该方法可以借助计算机来实现，利用工艺属性进行筛查并用经济标准来排序，从而从大量的工艺中选出满足设计要求的工艺。

当然，工艺选择的内容远不止这些。这可以视为系统方法的第一步，用以取代对于经验和过往实践的依赖。选择的收窄帮助很大，因为这样能很容易地找准方向，从而获取更为专业的知识并得到正确的解答。但是，最终的选择仍然要考虑经济因素和组织因素，这些因素只能是具体问题具体分析。

13.9 扩展阅读

1）*ASM Handbook* Series（1971—2004）. Heat treatment, vol. 4; Surface engineering, vol. 5; Welding, brazing and soldering, vol. 6; Powder metal technologies, vol. 7; Forming and forging, vol. 14; Casting, vol. 15; Machining, vol. 16. ASM International.

全套加工手册，偶尔更新。现在可在 http://products.asminternational.org/hbk/index.jsp 这个网站上找到。

2）Bralla, J. G.（1998）. *Design for manufacturability handbook*（2nd ed.）. McGraw-Hill, ISBN 0-07-007139-X.

读起来很晦涩，但包含很多我的书中关于制造工艺的信息。

3）Bréchet, Y., Bassetti, D., Landru, D., & Salvo, L.（2001）. Challenges in materials and process selection. *Prog. Mat. Sci.*, 46, 407-428.

用于获取材料和工艺属性的 KBE 方法的探索。

4）Budinski, K. G., & Budinski, M. K.（2010）. *Engineering materials, properties and selection*（9th ed.）Prentice Hall, ISBN 978-0-13-712842-6.

一本关于工程材料加工和用途的书籍，目前已是第 9 版。

5）Campbell, J.（1991）. *Casting*. Butterworth-Heinemann, ISBN 0-7506-1696-2.

关于铸造工艺的基础科学与技术。

6）Clark, J. P., & Field, F. R. Ⅲ（1997）. Techno-economic issues in materials selection. In: *ASM Metals Handbook*, 20. American Society for Metals.

一篇概述了技术成本建模原理及其在汽车工业中应用的论文。

7）Dieter, G. E.（1991）. *Engineering design, a materials and processing approach*（2nd ed.）. McGraw-Hill, ISBN 0-07-100829-2.

一本受人尊敬的书籍，现在是第 3 版，注重于技术设计中材料与工艺的定位。

8）Dieter, G. E., & Schmidt, L. C.（2009）. *Engineering design*（4th ed.）. McGraw-Hill, ISBN 978-0-07-283703-2.

Dieter 教授是以材料视野进行设计的先锋。这本书中关于概念化的章节值得关注。

9）Esawi, A., & Ashby, M. F.（1998）. Computer-based selection of manufacturing processes: Methods, software and case studies.. *Proc. Inst. Mech. Eng.*, 212, 595-610.

一篇关于工艺选择用 CES 数据库的开发和应用的论文。

10）Grainger，S.，& Blunt，J.（1998）. *Engineering coatings，design and application*. Abington Publishing，ISBN 1-85573-369-2.

用以提高表面耐久性（通常是表面硬度）的表面处理工艺手册。

11）Granta Design（2010）. *The CES Edu system* and other teaching resources，accessed from *www.grantadesign.com/education/*

12）Houldcroft，P.（1990）. *Which process?*. Abington Publishing，ISBN 1-85573-008-1.

这本书的书名有点误导性，仅仅涉及一个连接的工艺子集，即钢的焊接。但比较贴近本章的主题，即使得工艺满足设计要求。

13）Kalpakjian，S.，& Schmidt，S. R.（2008）. *Manufacturing processes for engineering materials*（5th ed.）. Prentice Hall，ISBN 978-0-13-2227271-1.

关于材料加工非常全面和广泛使用的书籍。

14）Kalpakjian，S.，& Schmidt，S. R.（2010）. *Manufacturing engineering and technology*（6th ed.）. Prentice Hall，ISBN 978-0-13-608168-5.

关于材料加工非常全面和广泛使用的书籍。

15）Lascoe，O. D.（1988）. *Handbook of fabrication processes*. ASM International，ISBN 0-87170-302-5.

关于制造工艺的参考资料。

16）Shackelford，J. F.（2009）. *Introduction to materials science for engineers*（7th ed.）. Prentice Hall，ISBN 978-0-13-601260-3.

一本从工程视野看材料的书籍。

17）Swift，K. G.，& Booker，J. D.（1997）. *Process selection，from design to manufacture*. Arnold，ISBN 0-340-69249-9.

以标准化格式给出的 48 种工艺，可用于指导工艺选择。

18）Wise，R. J.（1999）. *Thermal welding of polymers*. Abington Publishing，ISBN 1-85573-495-8.

关于热塑性塑料热焊接工艺的介绍。

第 14 章

案例分析：工艺选择



图 14.0 铝压铸件（感谢 Aluminum Recovery Technologies Kendallville，Indiana 提供的照片。）

14.1 引言

上一章介绍了工艺选择的系统流程，将设计要求作为输入参数，输出则是能够满足要求的工艺。随后，可利用成本模型对输出的工艺进行排序。本章将通过案例分析对工艺选择的方法加以阐述。前四个案例依然采用复印图表的方式，后两个案例则会给出计算机辅助选择工作的方式。

案例分析采用标准模式来讲解。首先，给出设计要求，包括材料、形状、尺寸、最小截面、精度和表面质量。然后，将这些要求在工艺矩阵中加以描述，以此来确定候选区域。候选区域中的工艺能够满足零件的设计要求，因此可作为候选工艺。如果没有任何工艺可以满足要求，则需要进行工艺组合，如铸造后进行机械加工或粉末成型后进行磨削。

更多关于工艺组合的细节读者可查阅“扩展阅读”所列的数据资源。此外，附录 D 给出了非常全面的数据资源汇编。通过上述筛查可得到一个候选工艺的子集，再结合具体到特定公司、地理位置或国家的一些实际情况，可做出最后的选择。

14.2 铝合金连杆铸造

内燃机通过连杆将摆动运动转化为回转运动，泵通过连杆将回转运动转化为摆动运动。这里我们将采用第 13 章给出的成本模型，来分析比较可用于铸造小型铝合金连杆的工艺。

1. 设计要求

连杆是一种由非铁合金制成的三维零件。连杆的质量约 0.3kg，且最小截面厚度是 8mm，如图 14.1 所示。工件的孔和表面后续会采用机加工来达到精度要求，因此对铸件的精度和公差要求不高。设定批量为 100000 件。表 14.1 对设计要求做了归纳。

表 14.1 连杆的要求

功能	连杆
约束条件	材料：铸造铝合金 形状：三维实体 预估质量：0.3~0.4kg 最小截面尺寸：8mm （以上四项）——技术层面约束 误差：<1.0mm（表面），<0.02mm（孔） 表面粗糙度：不重要 （以上两项）——品质层面约束 批量大小：100000——经济性约束
目标	成本最小化
自由变量	工艺选择
	工艺运行条件

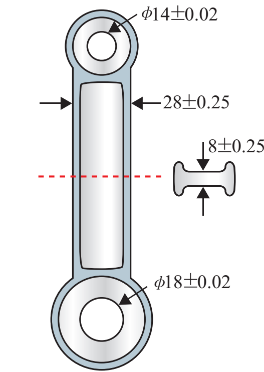


图 14.1 连杆（镗孔和镗孔端面的精度要求比其他部位高很多，因而需要后续机加工。）

2. 选择

将上述约束在工艺矩阵和图（图 14.4~图 14.10）中进行标识。由此可以发现，材料、形状和批量大小会排除其中大部分的工艺，只剩下三种铸造工艺和切削加工工艺。切削加工由于材料损耗过大，此处不做考虑，因而只剩下砂型铸造、压力铸造和低压铸造（见表 14.2）。

表 14.2 连杆成型工艺列表

工艺	评 论
砂型铸造+切削加工 低压铸造 压力铸造	由图 14.8 的工艺—公差图可知，这些工艺都不满足孔公差的要求，都需要进行后续切削加工

基于式（13.6）给出的成本模型，我们可以得到这些工艺的相对成本，由此可以发现更多的信息。相关的成本数据见表 14.3，其中所有的成本都以材料成本作了标准化处理。图 14.2 中给出了单位成本 C 与批量 n 的关系曲线。当生产批量较小时，工具成本（式（13.6）中的第二项）占主导地位。随着批量 n 的增加，工具成本的贡献逐渐下降（前提是工具寿命大于生产批量 n）。当曲线在某一点后变平时，意味着材料、劳动力成本和其他间接费用开始占主导地位。

表 14.3 所列工艺的成本模型数据

相对成本*	砂型铸造	压力铸造	低压铸造	备注
材料 $mC_m/(1-f)$ 基本费用 $\dot{C}_{oh}/h^{-1}$ 资产清算时间 2 年 负载系数	1 10 5 0.5	1 10 5 0.5	1 10 5 0.5	与工艺不相关的参数
专用工具成本 C_t 投资成本 C_c 生产率 $\dot{n}/h^{-1}$ 工具寿命 n_t/件	210 1800 3 200000	16000 30000 50 1000000	2000 8000 10 500000	与工艺相关的参数

* 所有成本都以材料成本做了标准化处理

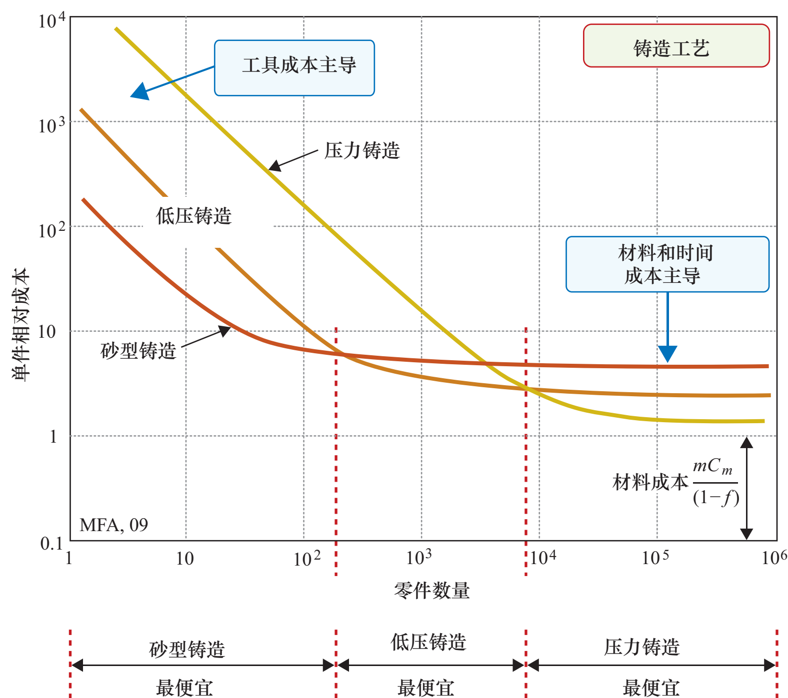


图 14.2 连杆铸造的相对成本—零件数量的关系（该成本以材料成本做了标准化处理。）

这些相互竞争的工艺，通常具有不同的工具成本 C_t 和生产率 $\dot{n}$，因而它们对应的 C-n 曲线会出现相交的情况。砂型铸造的设备便宜，但生产效率低。低压铸造的模具比砂型铸造要贵，铸造过程会稍快一些。压力铸造的设备更为昂贵，但同时铸造过程要快很多。对于上述三种工艺，这里我们假定材料成本、每小时劳动力成本和资产清算时间都相同。

砂型铸造、低压铸造、压力铸造的曲线在批量为 200 件的位置发生了相交。因此，批量少于 200 件时，砂型铸造更加经济。当批量处于 200~8000 件之间时，低压铸造的成本变得最低；当批量超过 8000 件时，压力铸造变得成本最低。显然，批量为 100000 件时，压力铸造是最佳选择。请注意：对于小批量，零件成本主要由工具成本主导，材料成本影响不大。但随着批量的增大，成本公式中的第二项逐渐减小。如果工艺更加快速，则单位成本会降至材料成本的三倍左右。

3. 附言

在选择工艺时，除考虑精度和光滑度外，还需考虑其他的质量问题。砂型铸造会有小的气泡和杂质，通常会成为零件（如连杆）在循环受载时的疲劳裂纹源。有些低压铸造技术可以使得液态金属平滑流入模具，从而减少缺陷。压力铸造需要使用高压，因而可以得到质量最好的铸件。类似考虑可以使得经济切换点发生变化，从而扩大最佳工艺的经济批量范围。

14.3 风扇成形

真空吸尘器风扇（见图 14.3）的设计通常要求便宜、低噪声且高效。最小化工艺成本的关键在于整个风扇的成形只用一道工序来实现，只留中枢部分辅以机加工，使其能与主轴匹配。这就意味着所选择的单一工艺只需要满足特定的精度和公差要求，不需要考虑圆盘或叶片机加工或精饰方面的要求。

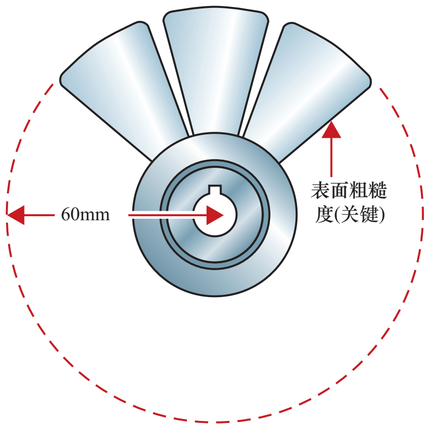


图 14.3 风扇由尼龙制成
（要求表面粗糙度值低，有一定的尺寸精度。需要大量生产。）

1. 设计要求

风扇的常用材料是尼龙。风扇的抽气速率由它的转速和尺寸决定。设计者给出的需求是一个半径为 60mm 的风扇，带有 12 个平均厚度为 4mm 的叶片。由风扇的表面积乘以厚度可得到风扇的体积（经粗略计算，约 $10^{-4}m^3$），尼龙的密度为 $1100kg/m^3$，由此可得到风扇的重量在 0.1～0.15kg 之间。尽管高度对称性使风扇的复杂程度有所降低，但其形状依然相当复杂。因此，我们将它归为三维实体。

从设计者的角度来看，平衡以及表面粗糙度非常重要。这两者与几何形状决定了风扇的抽气效率，同时会影响工作时的噪声。本例中，设计者规定公差为±0.5mm，表面粗糙度≤1μm。计划生产 10000 个风扇。

表 14.4 对上述设计要求做了归纳。那么，什么样的工艺能满足这些要求呢？

表 14.4 风扇的工艺要求

功　　能	风扇
约束条件	材料：尼龙 形状：三维实体 预估质量：0.1～0.15kg 最小截面厚度：4mm （以上——技术层面约束） 公差：±0.5mm 表面粗糙度<1μm （以上——品质层面约束） 批量大小：100000——经济性约束
目标	成本最小化
自由变量	工艺选择
	工艺运行条件

2. 选择

利用材料—工艺矩阵（见图 14.4）和形状—工艺矩阵（见图 14.5）给出的选择框可知，两张图表的交集有 5 类成形工艺（见图 14.5 中的矩形框）。紧接着，基于图 14.6 和图 14.7 的质量以及截面厚度的筛查标准，排除了聚合物铸造和 RTM，此时候选工艺只剩下三类。

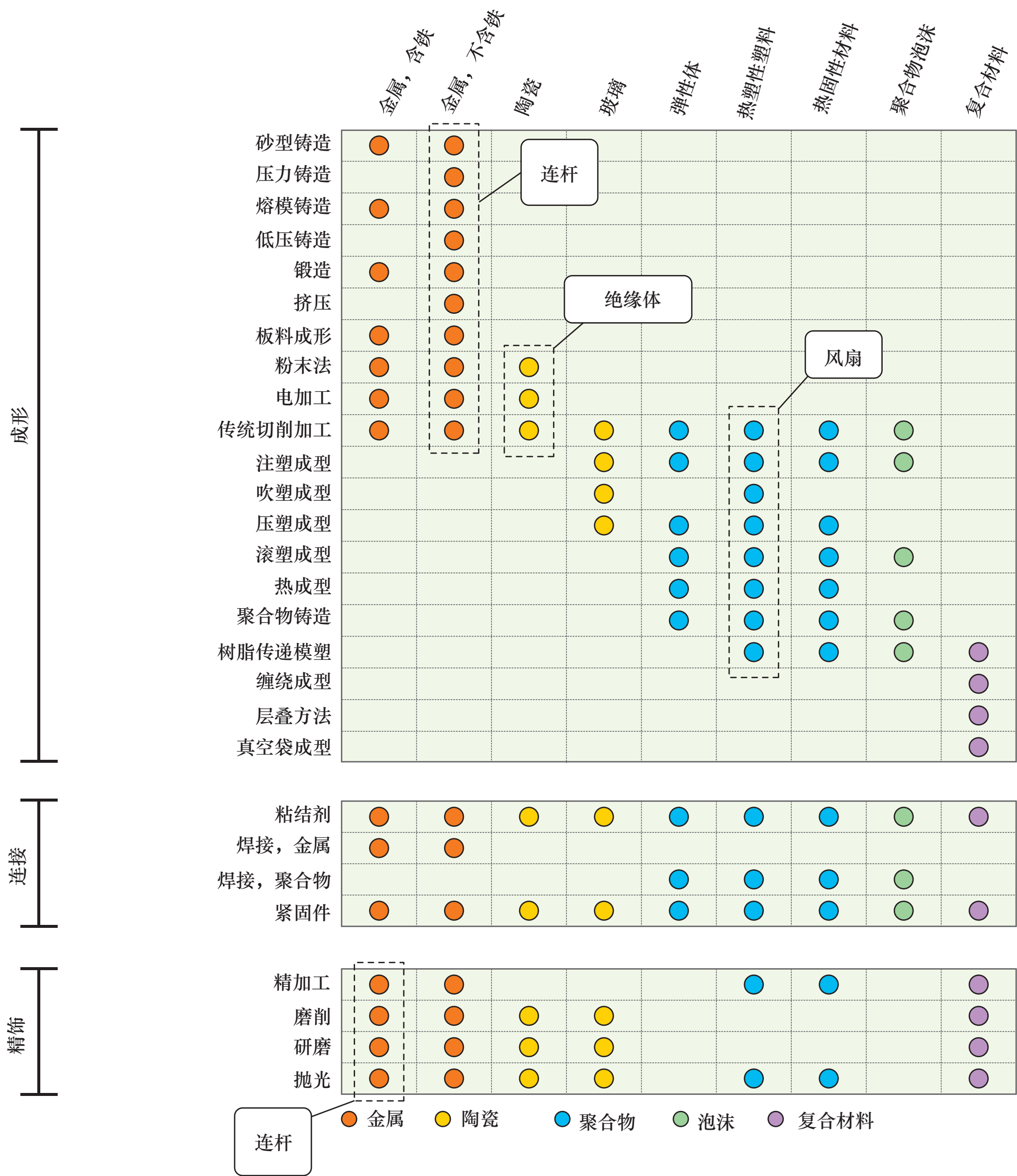


图 14.4 工艺—材料相容性矩阵，标注了案例分析的要求

（通过引入连接和精加工工艺，该矩阵可用于寻找满足更为严苛加工要求的工艺组合。）

设计要求给出的公差和表面粗糙度要求属于上限值，由图 14.8 和图 14.9 可知，上述三类工艺均能满足要求。计划产量为 10000 件，根据图 14.10 所示的经济批量大小—工艺关系，可排除实心体切削加工的方式。至此，剩余的候选工艺见表 14.5。

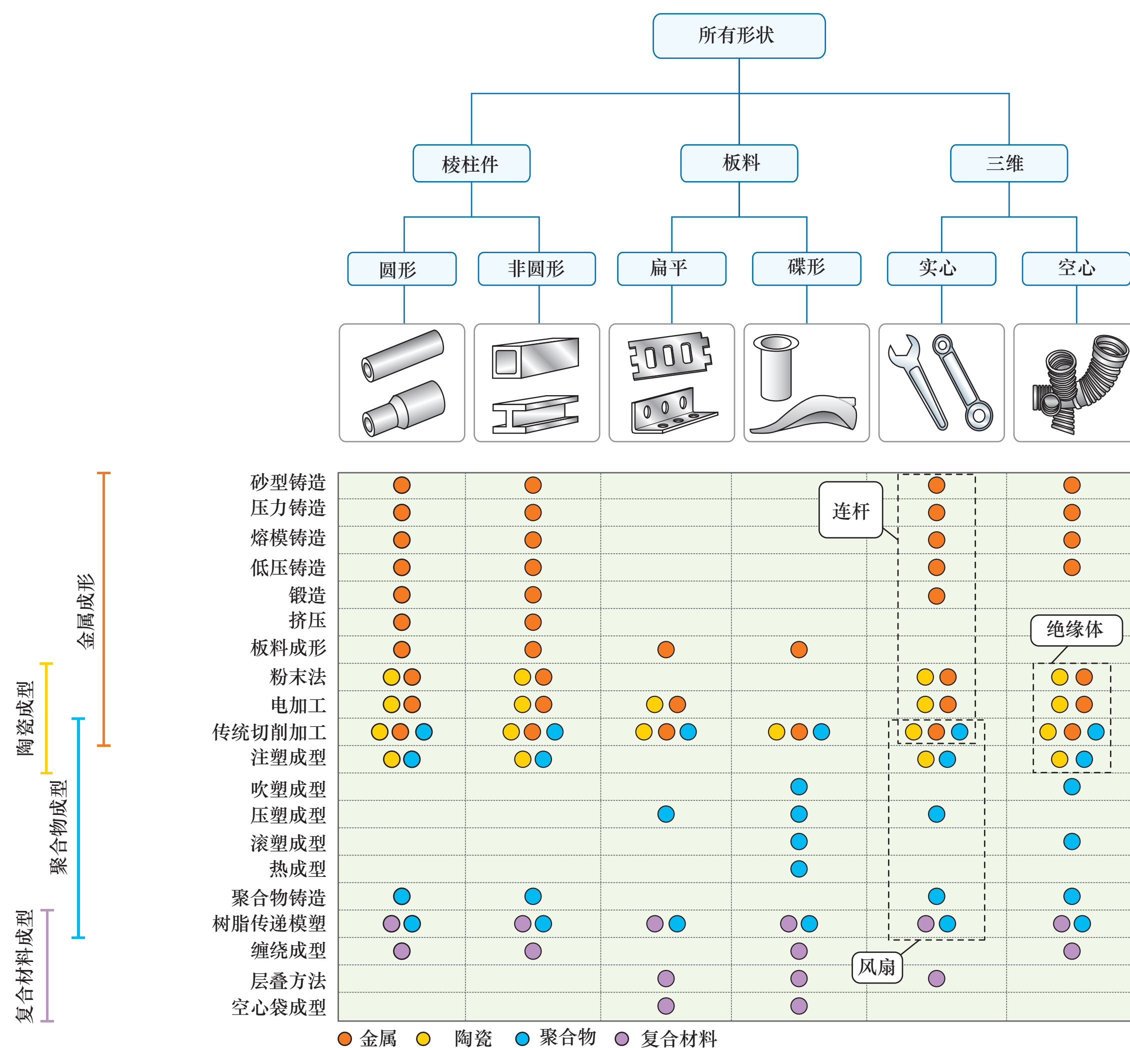


图 14.5 工艺—形状相容性矩阵，标注了案例分析的要求（左边给出了材料相容性的简单汇总。矩阵图中当前选择结果与上一步选择结果的重叠部分使得候选列表有所减少。）

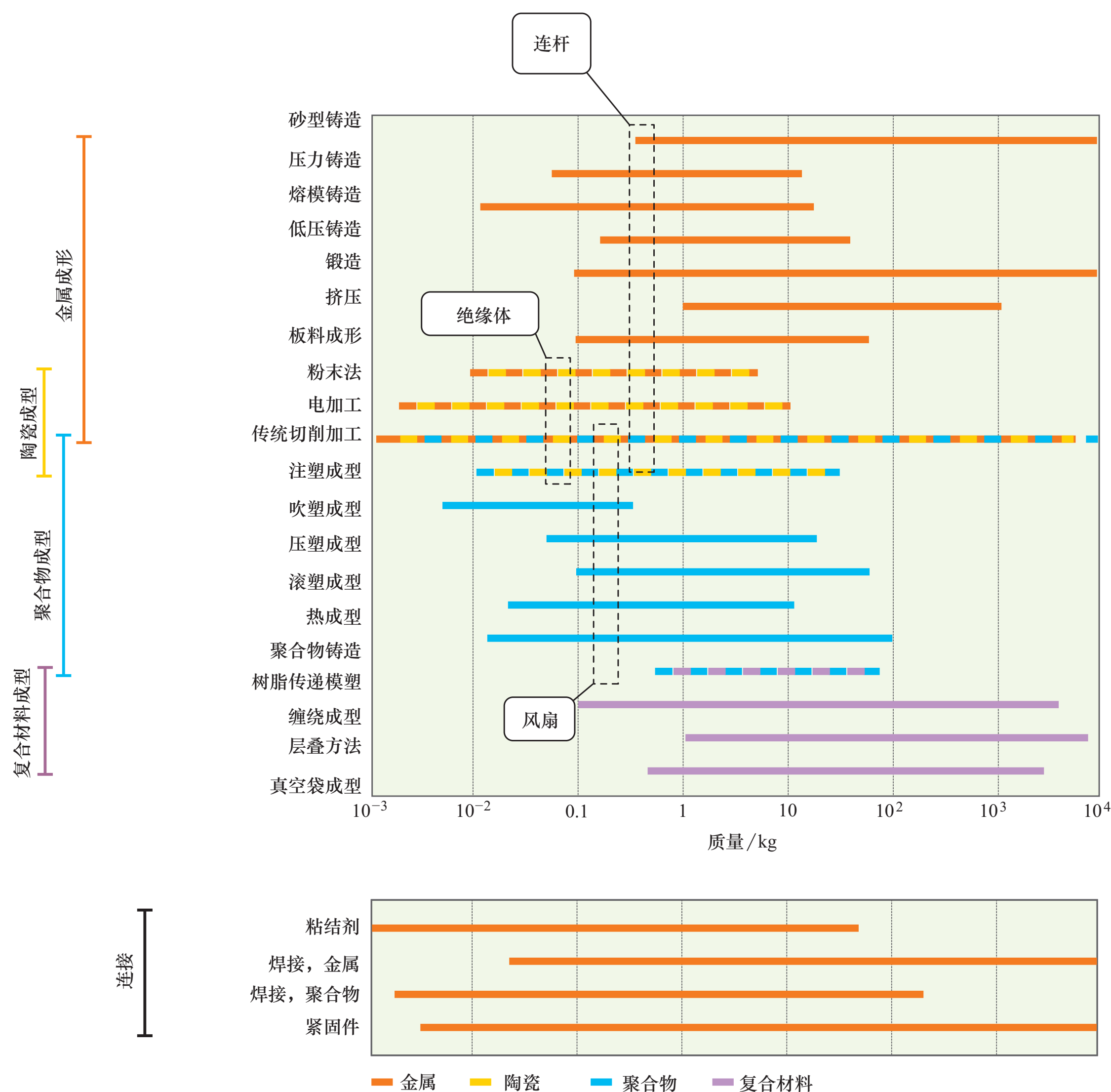


图 14.6　工艺—质量范围图表，标注了三个案例分析的要求（连接工艺的引入，可用于探索大型零件加工的组合工艺。）

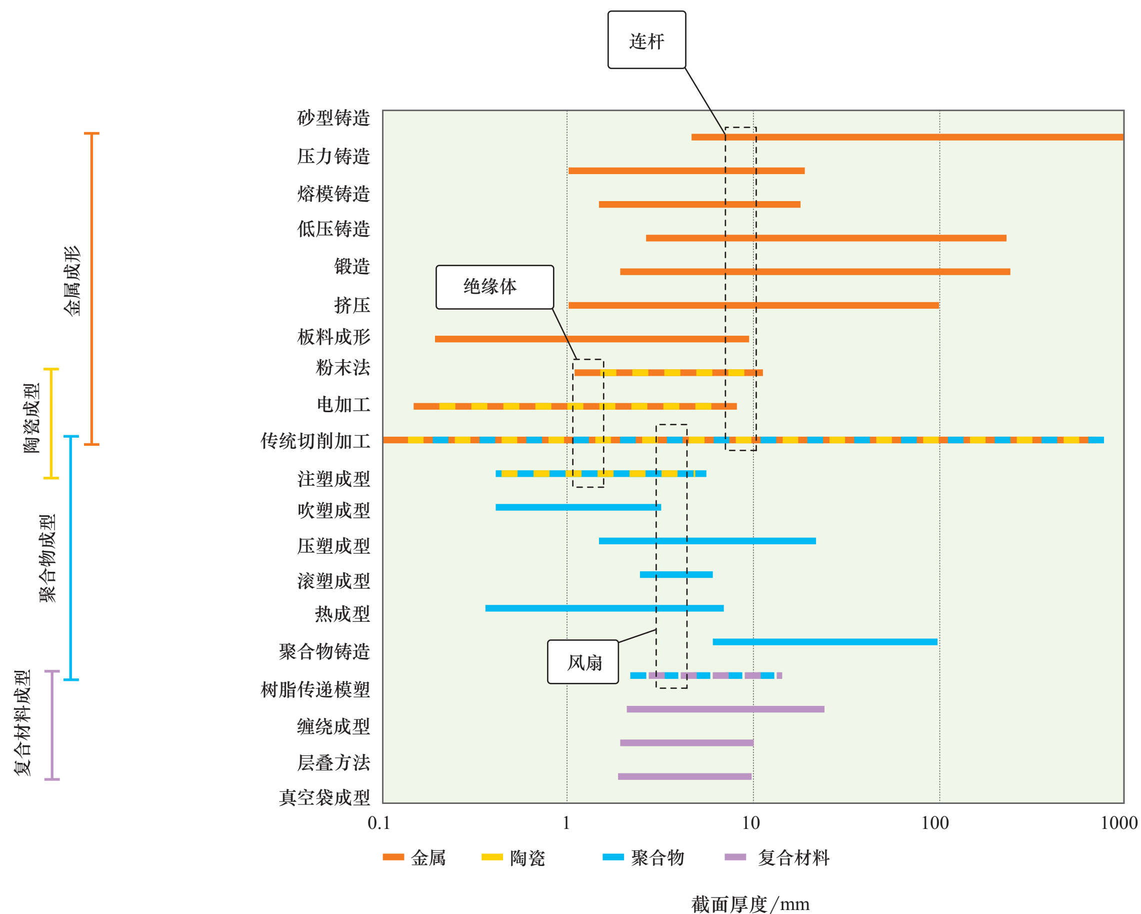


图 14.7 工艺—截面厚度图表，标注了三个案例分析的要求

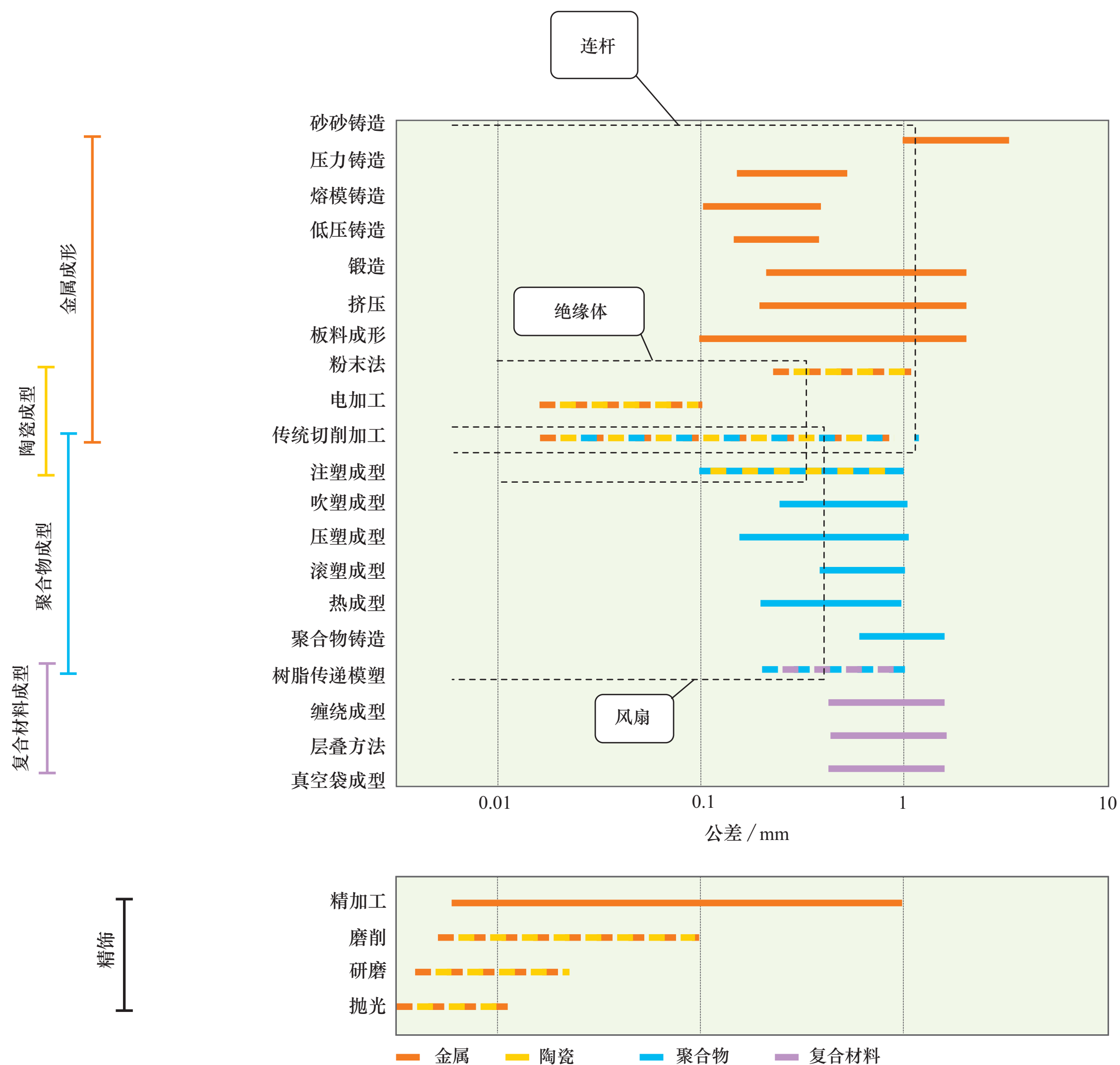


图 14.8　工艺—公差图表，标注了案例分析的要求（公差和表面粗糙度是一个上限值，因此选择框左侧是开口的。）

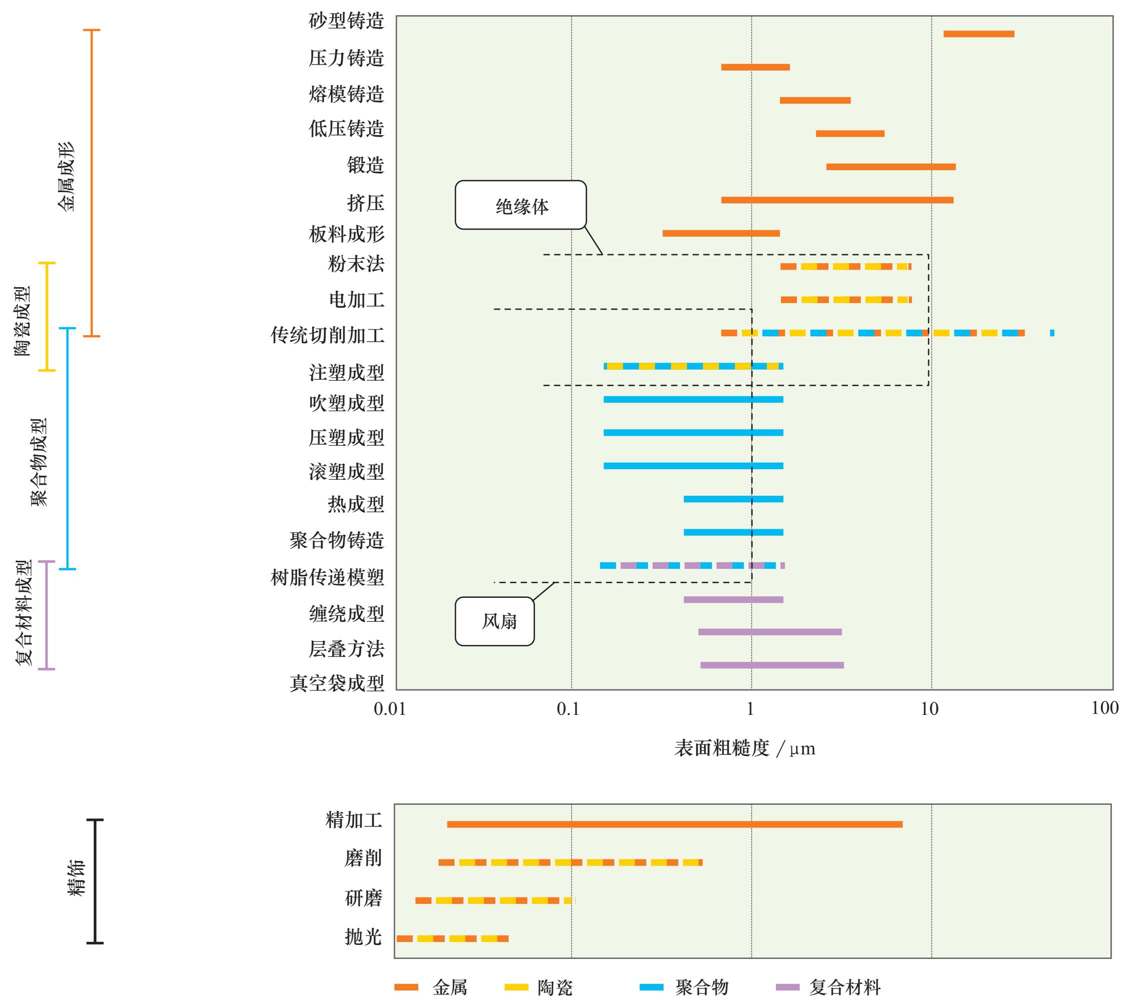


图 14.9　工艺—表面粗糙度图表（只有风扇的案例有这方面的要求。）

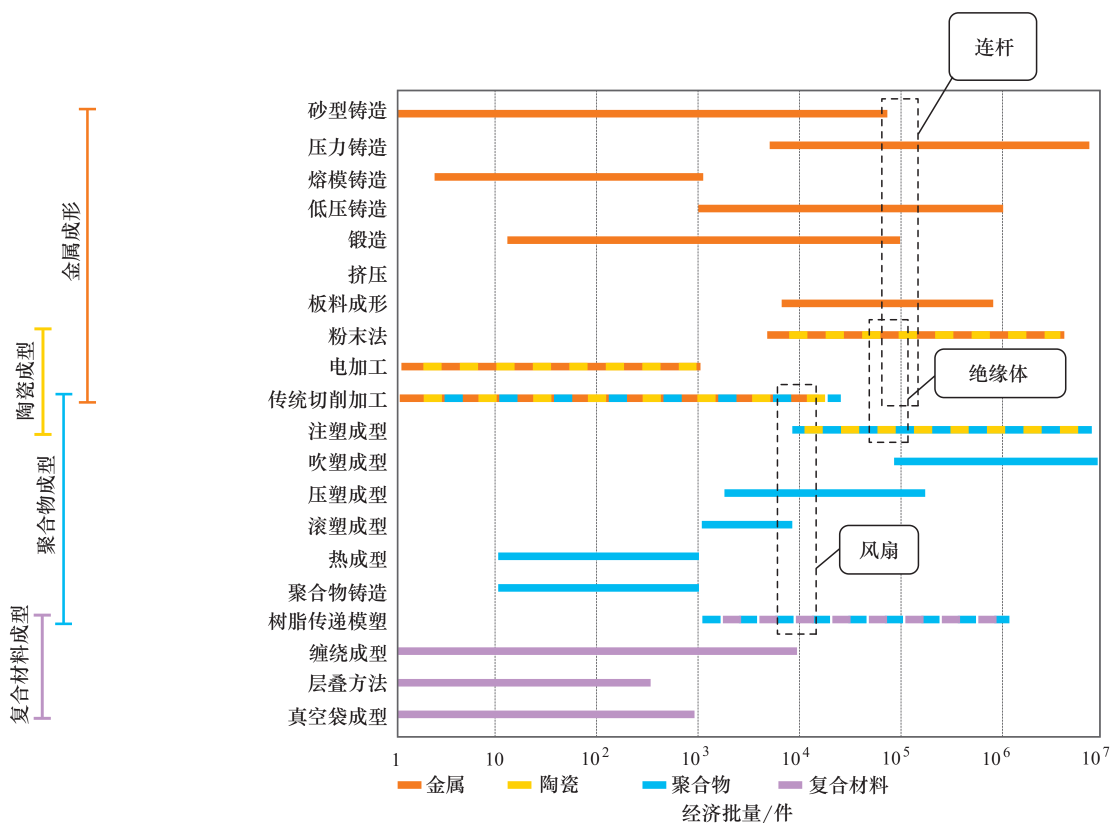


图 14.10 工艺—经济批量图表，标注了三个案例分析的要求（虚线框对应可能的生产批量范围。）

表 14.5 风扇的成形工艺

工 艺	备 注
注射成型	注射成型满足所有的设计要求
压塑成型	压塑成型可能需要进一步精饰处理

紧接着，我们可以利用成本模型来计算候选工艺的成本。成本模型中的相关参数见表 14.6。图 14.11 是基于成本模型得出的两种工艺的成本曲线。对比曲线可知，压塑成型的工具成本要低于注射成型的工具成本，但压塑成型的生产效率相对较低，因为注射成型可以采用一模多腔的方式来生产。两条成本曲线在生产量约为 10000 件相交。由此可说明：在生产量小于 10000 件时，压塑成型的成本较低，而高于 10000 件时，注射成型的成本更低。

表 14.6 表 14.5 所列工艺的成本模型数据

相对成本	压塑成型	注射成型	备注
材料 $mC_m/(1-f)$ 基本费用 $\dot{C}_{oh}/\text{h}^{-1}$ 资产清算时间 2 年 负载系数	1 20 5 0.5	1 20 5 0.5	与工艺不相关的参数
专用工具成本 C_t 投资成本 C_c 生产率 $\dot{n}/\text{h}^{-1}$ 工具寿命 n_t/件	2000 20000 30 100000	10000 10000 150 200000	与工艺相关的参数

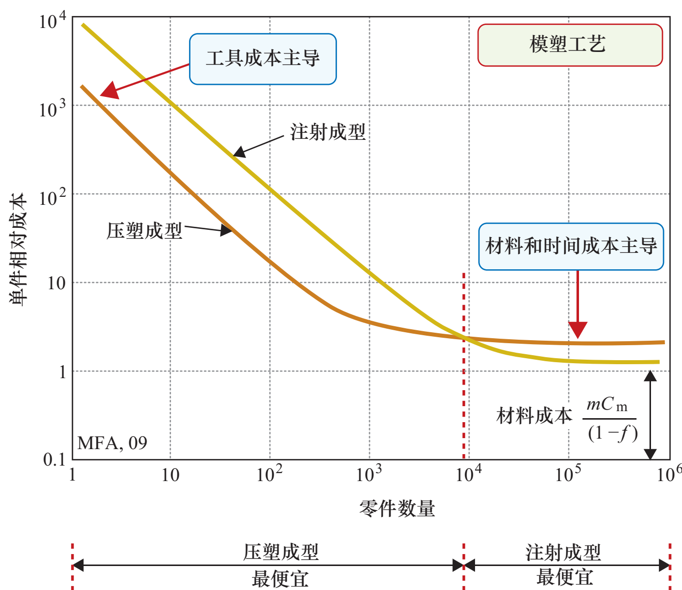


图 14.11 风扇成型的相对成本—零件数量的关系

（该成本以材料成本作了标准化处理。）

3. 附言

通常，还有一些问题需要加以考虑，如资本投资、当地技术、间接费分摊率等。在上述图表中，这些问题并没有反映出来。但上述过程已帮助我们缩小了选择范围，给出了可供选择的清单，且最终的选择基本上可以从所给出的候选工艺中获得。

相关案例：

见“飞轮材料”（见 6.6 节）、“铝合金连杆铸造”（见 14.2 节）。

14.4 火花塞绝缘体

到目前为止，使用复制图进行工艺选择的缺点显而易见。其一，图的分辨率有限且使用起来复杂难懂。其二，图只能帮助我们形成一个有用的概览，但无法得出确切的选择。计算机辅助方法可以有效解决上述两个问题。

早先提到的 CES 系统，是基于本书第 5 章给出的方法所建立起来的。它可以对材料、形状、质量、截面、公差和表面粗糙度加以限制，从而找到满足所有约束的工艺子集。随后，通过在经济批量柱状图中标注所需的生产批量大小，可用来剖析工艺的经济性。或者，也可以使用软件内置的成本模型来实现工艺经济性的分析。如果设计要求极其苛刻，没有任何一种工艺能够满足。此时，可以适当降低某些苛刻的要求（如公差和表面粗糙度），随后寻找满足更新后要求的工艺。在此基础上，寻找二次工艺来实现所需要的改良。

在接下来的两个案例分析中，我们将对上述方法进行展示。

1. 设计要求

图 14.12 给出了火花塞绝缘体的剖面图。它是一个装配结构，其中有一个是绝缘

体。该绝缘体由陶瓷和氧化铝制成，呈现轴对称、中空和阶梯形状。它的质量约为0.05kg，最小截面厚度为1.2mm。

由于绝缘体是装配结构的一部分，因此尺寸精度非常重要。设计要求的精度为±0.3mm，表面粗糙度值低于10μm。绝缘体的生产批量为100000件，要求成本尽可能低。表14.7对上述要求做了汇总。

表14.7 火花塞绝缘体的工艺要求

功　能	绝缘体
约束条件	材料：氧化铝 形状：三维空心 质量：0.04～0.06kg 最小截面尺寸：1.5mm （以上四项）——技术层面约束 公差：<±0.3mm 表面粗糙度<10μm （以上两项）——品质层面约束 批量大小：100000——经济性约束
目标	成本最小化
自由变量	工艺选择
	工艺运行条件

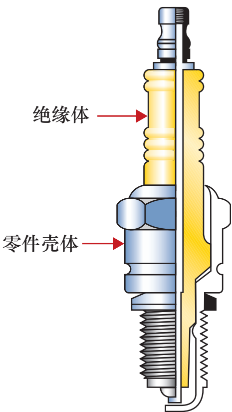


图14.12 火花塞（我们需要找到一种绝缘体生产工艺。）

2. 选择

将各种约束绘制在图14.4～图14.10所示的相容性矩阵和柱状图中，可发现：只有一种工艺满足要求，即粉末法。所要求的生产批量100000件处于该工艺的经济批量范围内。

粉末法包含一系列方法，包括模压烧结成型、热压成型、粉末挤压成型、粉末注塑成型、高温等静压成型以及喷射沉积法。我们可以这些都添加到图中，但这样会使得图显得非常复杂。因此，最好还是用计算机辅助的方法来处理这些信息，犹如CES系统所做的那样。

利用表14.7所列的约束条件，可筛选出两种满足要求的工艺：模压烧结成型和粉末注塑成型（PIM）。粉末注塑成型是将粉末与聚合物粘结剂混合后模压成型，随后在烧结过程中将粘结剂烧除。CES系统中引入了本书第13章中的成本模型。图14.13给出了基于该成本模型建立的粉末注塑成型工艺的单位相对成本与生产批量的关系。用户输入的参数在图的右上方。由图可知，在生产批量较低时，单位成本较高，而当生产批量大于10000件时，单位成本降至材料成本的两倍左右。

3. 附言

市面上的绝缘体一般都由粉末注塑成型工艺制成。对于火花塞这类大规模生产的零件，经济性是非常重要的，任何成本都要加以考虑。本书第13章所描述的专业成本模型，能够指导我们选出最佳设备以及最适宜的操作条件，从而使得成本最小化。

相关案例：

见“芯片散热器”（见6.18节）、“歧管管套”（见14.5节）。

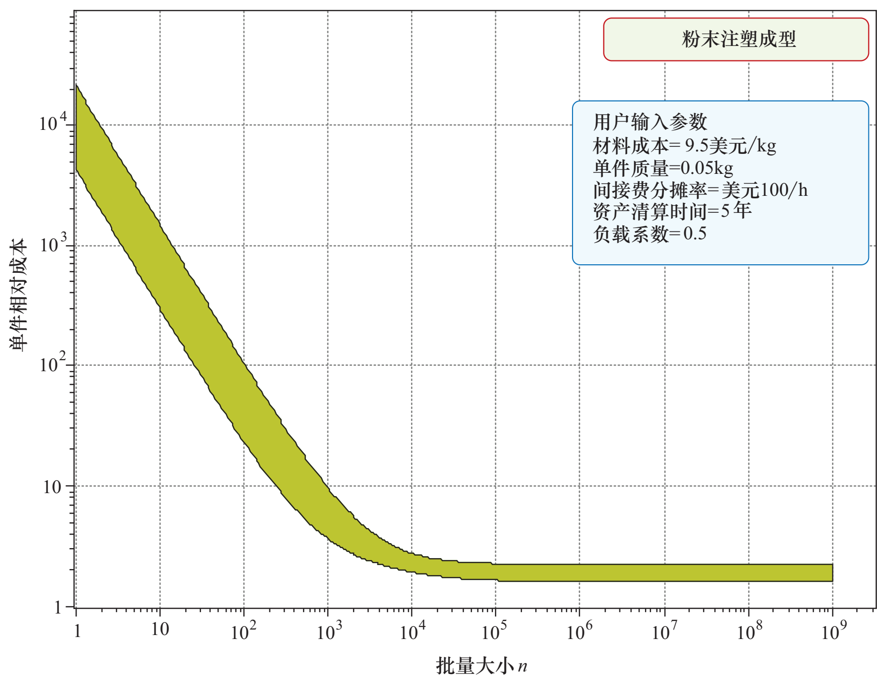


图 14.13 用粉末注塑成型工艺生产小型绝缘体的相对成本—批量大小的关系（该成本以材料成本作了标准化处理。）

14.5 歧管管套

1. 设计要求

图 14.14 所示的歧管管套是航天器推进系统的一部分，由镍制成。歧管管套很大，质量约为 7kg。形状复杂，属于不对称的三维中空结构。最小截面厚度为 2~5mm。精度和表面质量方面的要求较为苛刻，公差小于±0.1mm，表面粗糙度值小于 20μm。由于应用的局限性，只需生产 20 件。表 14.8 对上述要求做了归纳。

表 14.8 歧管管套的工艺要求

功　　能	歧管管套
约束条件	材料：镍 形状：三维空心 质量：7kg 最小截面尺寸：2~5mm } ——技术层面约束 公差：<±0.1mm 表面粗糙度：<20μm } ——品质层面约束 批量大小：20——经济性约束
目标	成本最小化
自由变量	工艺选择
	工艺运行条件

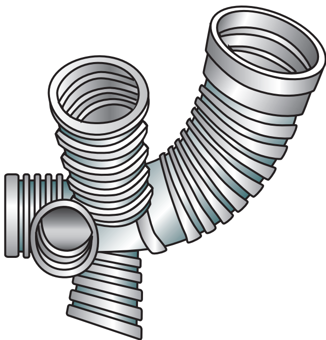


图 14.14 歧管管套

对于这种复杂零件，已经很难用图表来选择相应的工艺，此时需借助计算机辅助方法来实现工艺的选择。

2. 选择

将各种约束条件通过第 5 章图 5.12 左侧所示的约束条件对话框输入系统中。利用材料约束（镍）和形状约束（三维中空）就可以排除一大部分工艺。图 14.15 显示了筛选得到的 15 种可供选择的工艺。随后，利用生产批量和截面厚度过滤掉一大部分，只剩下 6 种可供选择的工艺。图中这些工艺用颜色作了标记。接着，在苛刻的公差和表面粗糙度要求下，只剩下电铸满足要求。我们所需的生产批量也处于电铸的经济批量范围内。

图 14.15 计算机辅助歧管制造工艺选择的输出结果

（变灰显示的工艺有一个甚至多个约束条件无法满足。）

3. 附言

从附录 D 中我们搜到了更为详细的信息，这些信息表明电铸成型工艺已有很多应用实践，且 20kg 左右的零件通常使用这种工艺制造。看来筛选得到的结果是个不错的选择。

相关案例：

见“火花塞绝缘体”（见 14.4 节）。

14.6 钢制散热器的连接

图 14.16 是国产散热器的剖面图，它由冷压波纹钢制成。我们的任务是选择一种连接工艺能实现两块板的接合。

1. 设计要求

工艺要与材料相容，这里的材料是厚度为 1.5mm 的低碳钢板。搭接处在工作时仅承受低载荷，但需能应付安装过程中施加的拉应力和剪切应力。搭接处需要能导热、防水，并能承受 100℃ 的高温。该零件整体都由钢材制成，因此报废时无须为了再循环利用而将二者拆开。表 14.9 总结了各种要求。

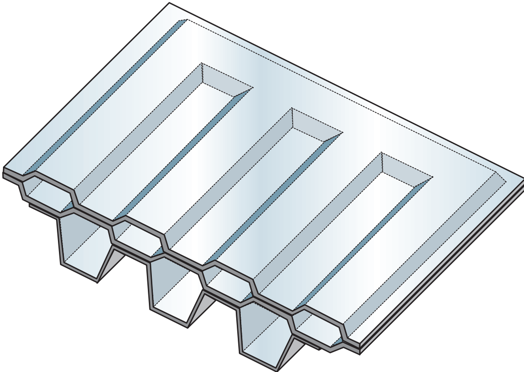


图 14.16 国产散热器剖面图（利用搭接连接方式将三块冷压波纹钢连接起来。）

表 14.9 钢制散热器的工艺要求

功能	国产散热器
约束条件	材料相容性：低碳钢 接头形状：搭接 承载方式：拉伸、剪切（有限的） 板料厚度：1~2mm 接头必须导热 接头必须防渗 工作温度>100℃ 不需要拆卸 ——技术层面约束
目标	成本最小化
自由变量	工艺选择 工艺运行条件

2. 选择

在 CES 系统中，一共有 52 种连接工艺及其属性。应用材料约束，可筛选出 32 种工艺，被去除的都是特定用于聚合物或复合材料的工艺。进一步应用几何形状、加载模式以及截面厚度，可以将候选列表减少至 20 种。导热的要求则将候选列表进一步降至 12 种。防水以及运行温度的约束未能进一步缩减候选列表。至此，筛查操作结束后得到的工艺见表 14.10。

表 14.10 钢制散热器连接的候选工艺列表

工　　艺	备　　注
钎焊	不同金属在电接触状态下存在腐蚀的风险
铜焊	
激光焊接	成本高，特种工艺
电子束焊接	
爆炸焊接	
熔化极惰性气体保护焊（MIG）	完善的传统焊接工艺
钨极惰性气体焊（TIG）	
手工焊（MMA）	
乙炔焊	
凸焊	
缝焊	

3. 附言

现在，我们来搜索对应这些工艺的文档。我们发现，爆炸焊要求特殊的设施和许可证。电子束焊接和激光焊接需要昂贵的设备，所以使用共享设备是改善其生产经济性的必要条件。电阻点焊由于不满足水密性条件而被筛除，尽管水密性要求只针对边部接缝处。

品质要求不严格，但畸变和残余应力会使相邻连接点的组装变得困难。低碳钢具有很好的焊接性能，因此焊接时不太可能造成裂纹或脆化，这可以通过查阅文档来加以确认。

14.7 球轴承内、外圈的表面硬化

球轴承内、外圈的滚珠会沿着导轨槽运动（见图 14.17）。球轴承内、外圈的寿命主要受限于疲劳和磨损，因此两者都禁止使用硬的材料。硬的材料韧性不好，冲击载荷或滚珠的不正确运转会导致轴承内、外圈有断裂的危险。

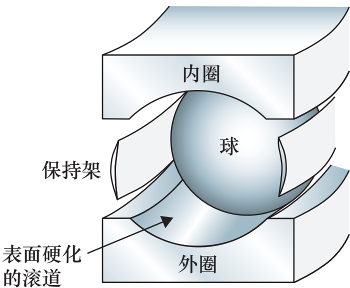


图 14.17 轴承内、外圈剖面图（内、外圈表面进行硬化处理以防止磨损和疲劳裂纹的萌生。）

1. 设计要求

解决方案是采用具有良好整体性能的合金钢，并通过不同的表面处理来提高重要位置的硬度。因此，我们要寻找一种合金钢的表面硬化工艺，使内、外圈有好的耐磨性和抗疲劳性能。滚珠和轴承内、外圈的精度要求都极为严格，所以所选择的工艺必须能得到高的尺寸精度和良好的表面粗糙度。表 14.11 对上述需求做了归纳。

表 14.11 球轴承内、外圈的表面硬化处理

功能	球轴承内、外圈
约束条件	材料：合金钢 处理目的：表面硬化以耐疲劳和耐磨损 曲面覆盖度：很好 （以上三项）——技术层面约束 精度和表面粗糙度不能妥协——品质层面约束
目标	最小花费
自由变量	表面处理工艺选择
	工艺运行条件

2. 选择

CES 系统中存有 46 种表面处理工艺的记录，大多数工艺与合金钢相容。这里表面处理的目的是要得到好的耐磨性和抗疲劳性，这一要求使得候选列表中只剩下 8 种工艺。表面粗糙度的要求又淘汰了涂层和变形工艺，因为这些工艺会使表面光洁程度有所下降。在应用了曲面覆盖度约束（好或者非常好）之后，候选列表中仅剩下 5 种工艺，见表 14.12。表中的记录对这些工艺作了阐述，并归纳了它们的典型应用。

表 14.12 合金钢球轴承内、外圈表面硬化工艺列表

工艺	备　注
渗碳 碳氮共渗 渗氮 渗铝 渗硼 渗铬	所有工艺都属于高温、扩散控制工艺，因此效率比较低。记录中给出的文档提供了详细的信息

3. 附言

为深入了解这些工艺，我们查阅了相关文档，发现：表面硬度和硬化层的深度取决于以下工艺参数：处理的时间和温度，以及钢铁的组成成分。当然，经济性必须加以考虑。此外，球轴承内、外圈的产量很大，尽管它们的尺寸不一，但几何形状一样。因此，专用设备即便昂贵，对于此类零件的生产组织也是切实可行的。

14.8 本章小结

工艺选择第一眼看起来就像魔法：发起人很了解，但剩余的人都猜不出他们是怎么做到的。但是，正如本章论证的那样，事实并非这样。基于第 13 章提出的系统方法，我们可以仅仅利用设计信息，如尺寸、形状、复杂度、精度、表面粗糙度和材料，来识别出一个可行的工艺子集。至于材料的选择，同样可以基于第 5 章提出的系统方法来完成。这种方法并不能选出确切的最佳工艺，因为最佳工艺的识别依赖于太多的个案思考。但是，通过识别出候选工艺，可以帮助用户找到所需要的数据资源（附录 D），其中所列的很多信息有利于用户做出最终的工艺选择。

材料与环境



图 15.0　我们的地球

15.1　引言

人类的所有活动都会对环境有一些影响，对此环境有一定的自理能力，可以抵御一定程度的影响，不致使环境发生持续性的破坏。但是，现如今人类活动的频率已远远超越环境自理能力所能承受的极限，导致我们所居住的环境质量明显下降，甚至威胁到下一代的幸福。产品的制造和使用，以及与之相关的材料与能量的消耗，都是导致环境破坏的罪魁祸首。当前我们面临的形势是非常严峻的。随着每年全球人口 3%的增长率，我们在未来 25 年里开采、加工和消耗的资源甚至比人类整个工业历史所使用的资源还多！

“面向环境的设计”通常可理解为调整我们现行的设计方法，以修正已知的、可预见的环境退化；考虑的时间跨度约为 10 年，也就是一般产品的预期生命周期。“可持续性设计”是一种更为长远的打算，即我们为满足自身需求而对生活方式所做的改变不能影响到我们的下一代。就其时间跨度而言，很难进行界定，以十年或百年计。此外，我们所需要做出的改变更多。本章着重讲述在面向环境的设计中，材料和工艺所扮演的角色。可持续性要求社会和政治的变革，这超出了本书的范畴。

本章的观点在“扩展阅读”第一个条目中做了进一步的阐述。

15.2 材料生命周期

仔细查阅图 15.1 所示的材料生命周期框架图，我们可以发现问题的本质。矿石和原料这些加工材料大多是不可再生资源，由这些材料制成的产品，为人们所使用直至其生命周期的尽头，最终将被处理掉。这其中，一部分可能进入再生循环，剩余部分则进行焚化或填埋。在这个循环中的每个阶段都有能量和材料的消耗，同时伴有 CO_2 以及其他排放物（废热和气体、液体及固体废弃物）对环境造成的损害。

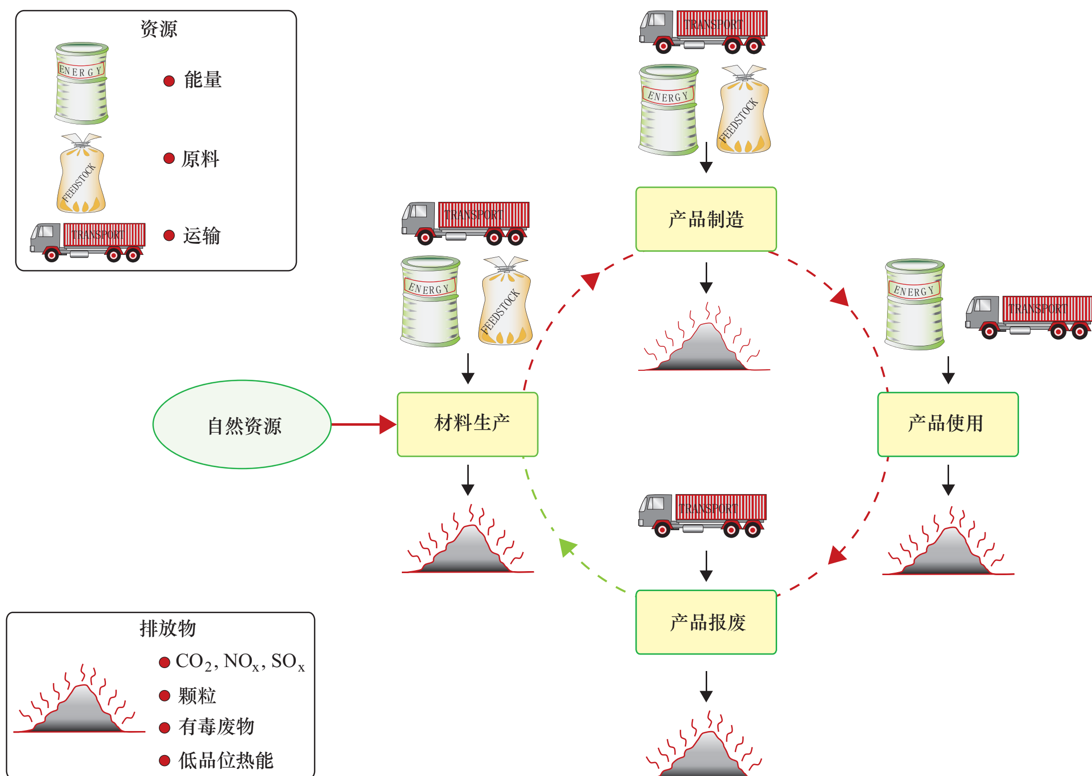


图 15.1 材料的生命周期（矿石与原料经由开采和加工后被制成材料，然后加工成产品。这些产品为人们所使用，直至其生命周期终结时被丢弃或回收再利用。在这个周期的每个阶段，都有能量和材料被消耗，同时伴有废热和固体、液体及气体排放物的产生。）

课题的关键在于，这些副作用的总和已超过了环境所能吸收的容量。某些环境损害是局部范畴的，我们可以追根溯源，从而采取一些补救措施。但是，有些环境损害是国家层面的，有些甚至是全球性的，补救措施需要更为广泛的社会与组织先决条件。现行的与环境相关的法律法规，大多旨在适度减少损害环境的活动。例如，有项法规要求客车的平均油耗要降低 20%，这对于客车制造商来说，是一项挑战。

可持续性则要求完全不同的解决方案。即便是最为保守的估计，为恢复与环境之间的长期平衡，图 15.1 中的人类活动至少减少四分之三，甚至更多。人口增长以及人口预期的增长，远大于取消发达国家的任何适度储备。正是这一点挑战极大，很难适应，也正是在这一点上大家莫衷一是。但是，这也使得生态设计成为创造性思考的基础。

15.3 材料与能量的消耗系统

看起来，节省材料显而易见的方式是制造更小的产品，延长产品的生命周期，并且在它们生命周期终结时对材料进行循环利用。但是这个“看似明显”有时候带有迷惑性。如图 15.2 所示，材料与能量构成了复杂且高度关联的系统，其中导致消耗的主要诱因有新技术、计划报废、财富增长、教育以及人口增长等。这些因素影响着产品使用的方方面面，同时影响着材料与能量的消耗，以及所产生的副作用。图中连接线代表不同的影响。绿色线代表积极的、大致可取的影响；红色线代表负面的、不受欢迎的影响；红绿混合的线代表该驱动同时有正面和负面影响。

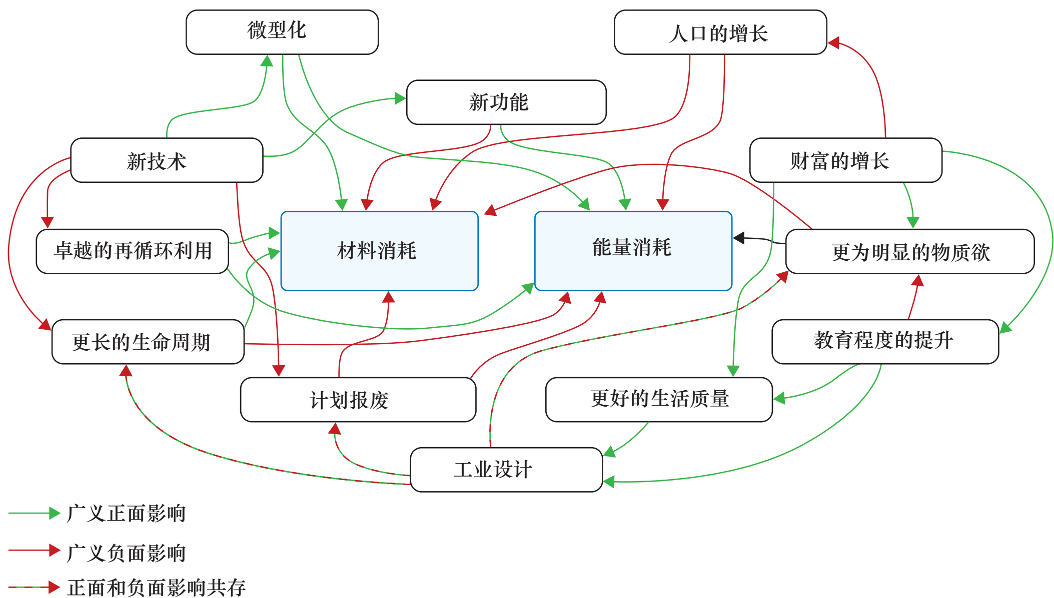


图 15.2 材料与能量消耗的影响因素（把生态设计看作系统问题是必要的，不是简单的选择“好的”材料和避免“坏的”材料，而是针对系统需求去匹配合适的材料。）

由图可见系统的复杂程度。这里我们以新技术为例，来看看它所带来的影响及后果。新技术的出现，创造了许多新的材料以及节能的产品，但在带来新功能的同时也产生了产品报废，以及替换仍旧可用的产品的欲望。电子产品是上述现象的典型代表。大多数电子产品会在仍旧可用的情况下被丢弃。单从这个层面，我们可以察觉延长产品生命周期这种看起来显而易见的措施所带来的后果。当然，延长产品生命周期可以节约材料（正面影响），但在一个新技术不断投送高能效产品（特别是汽车、电子和家用电器）的时代，延长老旧产品的生命周期反而会对能量消耗产生负面影响。

再举一个工业设计两面性的例子，这也是第 16 章的主题。过去的耐久设计使得很多产品仍能得以被珍藏和保留，这是工业生产能力的有力证据。而如今，工业设计被更多地用作为促进消费的有力工具，通过给消费者制造一种“新的”就是令人满意的，而稍“旧的”就是乏味的感觉来鼓励报废。

表 15.1 给出了产品的使用模式矩阵。第一排的产品需要消耗能量来实现其基本功能；第二排的产品可以在不消耗能量的情况下工作，但从舒适性、方便性和安全性角

度出发，需要消耗能量以提供辅助功能；第三排的产品除了人力以外不需要消耗任何能量就能实现其基本功能。顶部的负荷因子是产品使用强度的近似衡量。很显然，该值的变化范围很大。

表 15.1 产品的使用模式矩阵

	高负荷因子	中等负荷因子	低负荷因子
主要能量消耗	家用车 玩具火车 飞机	电视机 冰箱	咖啡机 真空吸尘器 洗衣机
中等能量消耗	房屋(热、光)	停车场(光)	家用餐具 衣服(洗涤)
无能量消耗	桥 道路	家具 自行车	轻舟 帐篷

能量短缺 ↕ 材料短缺

高影响 ←→ 低影响

材料与工艺的选择会对图 15.1 中的各个阶段产生影响，主要体现在以下方面：

1）材料生产阶段——资源的排放以及精炼的附加作用。

2）产品制造阶段——成形、连接以及精饰工艺的效率与清洁水平。

3）产品使用阶段——通过轻量化设计、高热效率及更低的能耗达到的节能能力。

4）产品报废阶段——可再用、拆卸和再循环的能力。

一般来说，图 15.1 中四个阶段的某一个阶段总会占据主导地位。这里稍稍简化一下，我们利用能耗来评估每个阶段的输入以及副作用，然后将其作为使用部门的品质鉴定。图 15.3 给出了利用这种方法得到的相应结果。仔细观察可以发现，结果隐含两个重要的特点。第一个特点是，基本上一个阶段总会占据主导地位，消耗 80% 甚至更多的能量。如果要有所改观，必须以这个阶段为调整对象。因为对于其他几个阶段的调整，即便是降低 50% 甚至是 90% 的能耗，对最终总的影响也是微乎其微。第二个特点是，当各个阶段的影响差异大到如图 15.3 所示的程度时，精度已经不再是问题，两

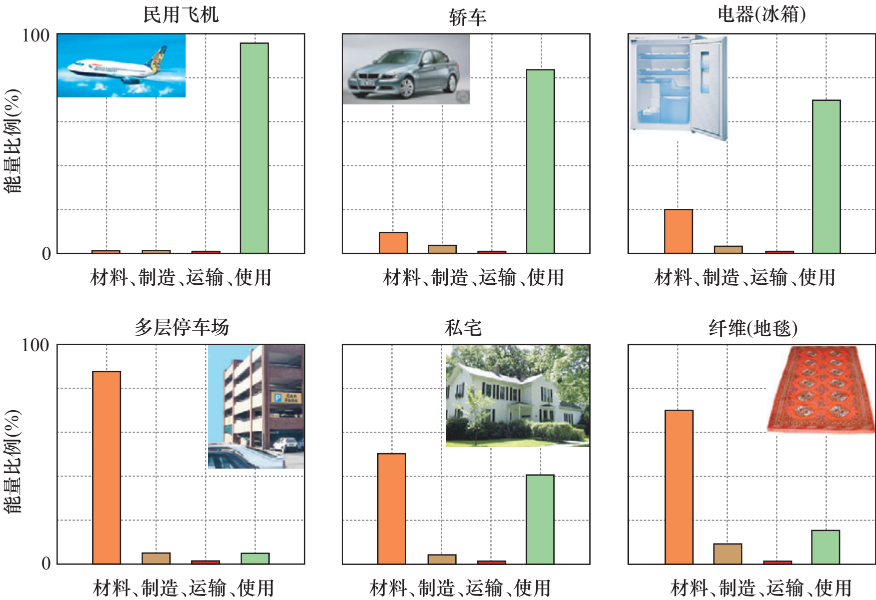


图 15.3 不同产品在图 15.1 所示各个阶段所消耗的能量

倍的误差带来的变化很小。人们在进行事物的测量时，都期望能精确测量并以获得精确数据为最终目标。但是，有些时候即便没有精确数据，很多工作依然能推进，基于不精确的数据也能做出精确的判断。这一点很重要，因为很多生态性能的信息并不精确。

15.4 材料的生态性能

15.4.1 材料生产：能量和排放

图 15.1 中四个阶段消耗的大部分能量都是从化石燃料中获取的，其中一些是以汽油、石油、煤或炭的形式被消耗，很多则必须首先转化为电力，欧洲的平均转化率约为 38%。但是并非所有的电力都是由化石燃料生成的，也有一些源于水力发电、核电和风电。然而，除了挪威（70%水力发电）和法国（80%核电），大部分国家的主要能源依然是化石燃料。由于欧洲国家的电网都是相连的，国家与国家之间有能量流动的需求，因此本章使用欧洲每千瓦特发电量平均消耗的化石燃料能源是合理的。

生产每千克材料所消耗的化石能源称为材料的内涵能。部分能量会被储存在所创造出来的材料中，从某种意义上来说，在产品生命周期终结时这些能量可以被再利用。大部分聚合物由石油制成，其内涵能是以另一种形式，即以石油为基本原料的方式存储于材料中。诸如木头一类的天然材料也有类似的“本征”或“包含”能，但其来源是树木自身在成长过程中吸收的太阳辐射能。对于是否把本征能归类到内涵量，大家莫衷一是。有一种说法，认为不仅聚合物和木材有本征能，金属同样也有，这些能量可以通过化学反应或将金属制成细小粉末并燃烧来释放。因此，在报道聚合物的生产能量时忽略这个事实，而在报道金属时又搬出这个事实，显得有点前后矛盾。因此，我们将不可再生资源的本征能包含在内涵能中。一般说来，内涵能的范围主要为 25~250MJ/kg，有一些会更高。针对“本征能”，还有另外一个结论：由于“本征能”的保留，材料循环利用所需的能量有时候比它第一次生产所需要的能量要少得多。通常本征能为 10~100MJ/kg。

生产 1kg 材料会造成一些不想要的气体排放，其中尤以 CO_2，NO_X，SO_X 和 CH_4 受到广泛关注（全球变暖、土地酸化和臭氧空洞）。气体排放量甚至很大。由表 15.2 可知，从化石能源生产每千克原铝会产生 9kg CO_2、40g NO_X 和 90g SO_X。材料的生产通常会产生一些不希望得到的排出物，尤其是有毒废物和微粒物质。不过，从理论上来讲这些可以在源头加以处理。

表 15.2 一种 1000 系列锻打铝合金的生态性能

材料生产:能量与排放	
内涵能	195~210MJ/kg
二氧化碳	9~10kg/kg
氮氧化物	72~79g/kg
硫的氧化物	120~140g/kg
材料加工能量	
铸造能	2.5~2.8MJ/kg
最小蒸发能	17~19MJ/kg
90%变形程度的最小能量	2.55~2.8MJ/kg

（续）

生命周期终结	
下降性循环	是
再循环利用	是
生物降解	否
焚化	否
填埋	认可的
能量再循环	17～20MJ/kg
循环馏分	52%～58%

材料内涵能以及 CO_2 排放量的近似值可参阅附录 A。

15.4.2 材料加工能量的评估（总转化效率 15%）

很多加工依赖于铸造、蒸发或者变形，因此对这些加工方法所需的能量大小建立一个初步的概念是很有帮助的。材料加工过程初始能量（等效油量）的使用涉及几个能量转换步骤，每一步骤的转化效率都小于 1。很多加工过程使用电能，这些电能由初始能量按 38%的转化效率转化而来。在利用这些电能完成电加热或电加工（如电铸）时还会产生额外的损失。废料、废弃材料以及其他废品这些加工过程的产出物，也会带走一部分能量。利用铸造、成形或锻造工艺，我们可以有效避免这类能量的损失。

其他工艺路线涉及其他能量的转化过程，当然也会带来相应的损失。对于材料熔化、浇铸、蒸发或成形工艺，评价其所需的能量是切实可行的。但为了将其表示成初始能量的单位形式，必须除以每一步转化效率的乘积。本例中我们设定这个综合效率为 15%。

1. 熔化

为了熔化一种材料，首先要求输入最小热量 $C_p(T_m-T_0)$，使其加热至熔点，再辅以溶解潜热 L_m，材料即开始熔化。

$$H_{\min}=C_p(T_m-T_0)+L_m \tag{15.1}$$

式中，$H_{\min}$为熔化每千克材料所需的最少能量；C_p 是比热容；T_m 是熔点；T_0 是环境温度。L_m 和 C_pT_m 之间有紧密的联系：

$$L_m\approx 0.4C_pT_m \tag{15.2}$$

对于金属和合金，$T_m\gg T_0$，从而可知：

$$H_{\min}\approx 1.4C_pT_m \tag{15.3}$$

假设转化效率为 15%，则熔化 1kg 材料的近似能量 H_m^* 为：

$$H_m^*\approx 8.4C_pT_m \tag{15.4}$$

式中，星号代表该值是一个估算值。对于金属和合金，H_m^* 的值为 1～8MJ/kg。

2. 蒸发

根据经验，蒸发的潜伏热 L_v 比熔化的潜伏热 L_m 大，前者是后者的（24±5）倍，并且沸点 T_b 是熔点 T_m 的 2.1±0.5 倍。基于和前述一样的假设，我们可知蒸发 1kg 材料所需的近似能量为：

$$H_v^*=76C_pT_m \tag{15.5}$$

同样，假设转化效率为 15%，对于金属和合金，H_v^* 的值为 6～60MJ/kg。

3. 成形

轧制和锻造这类成形工艺通常涉及大变形。假设平均流动应力为 $(\sigma_r+\sigma_{uts})/2$，应变约为 1，转化效率为 15%，则 1kg 材料的变形能为：

$$W_D^* = 3(\sigma_r+\sigma_{uts}) \tag{15.6}$$

式中，σ_r 是屈服强度；σ_{uts}是抗拉强度。对于金属和合金，W_D^* 的值为 0.05～2MJ/kg。

综上可知：与材料生产所需的能量相比，材料的铸造或成形过程所需的能量要小一些，但是材料的蒸发过程所需的能量则与之相当。

15.4.3 生命周期终结

图 15.4 给出了各种处理选项：垃圾填埋、燃烧热回收、再循环、修复和再利用。

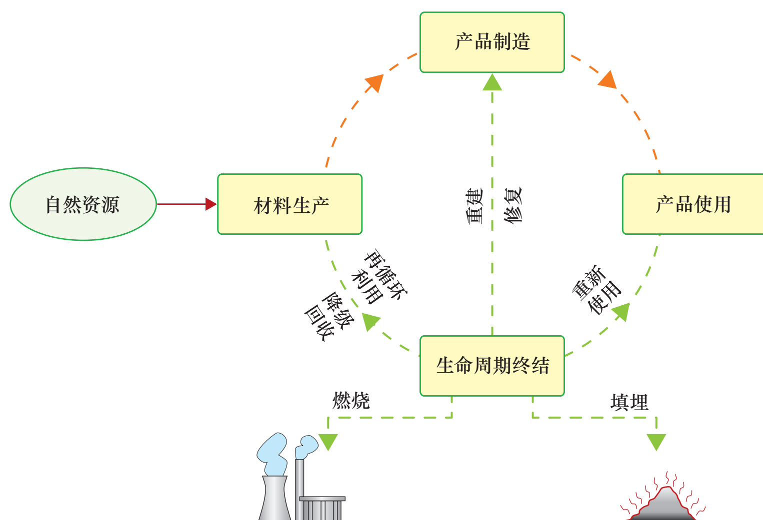


图 15.4 产品生命周期终结后的处理选项：垃圾填埋、燃烧热回收、再循环、修复和再利用

1. 垃圾填埋

很多我们现在不需要的物品都会采用垃圾填埋的方式进行处理。由此带来了一个问题——在一些欧洲国家，可用于填埋垃圾的土地已近饱和。为此，管理部门通过征收垃圾填埋税来予以限制，现如今一些地方的税收接近每吨 50 英镑且在持续上涨，试图引导大家采用图 15.4 中的其他方式来处理垃圾。

2. 燃烧热回收

众所周知，材料含有能量。与其扔掉它们，不如将它们回收起来，采用控制燃烧收集热量的方式来再利用材料的部分能量显然更好。但这并非听起来那么容易，首先需要对可燃烧和不可燃烧的材料进行一个大致分类。接着，燃烧过程必须在不产生毒烟或残毒的情况下进行，涉及高温、复杂控制，且设备昂贵。能量回收并不能做到百分百，一是因为燃烧不完全；二是因为部分能量被用于气化垃圾中的水分。

3. 再循环

再循环需要能量，这些能量一般由汽油来提供。但是，相比于最初生产所需的能量，再循环能量通常都很小，使得其成为常用的节能措施。然而，再循环并非一直是有成本效益的方案，取决于材料分类的程度。在生产或制造阶段产生的废料未曾扩散，

因而基本上可达到100%的回收并加以再循环利用。散落四处的废料，如那些废品的材料，则需要花费更多的成本来进行收集、分离和清洁工作。尽管有些材料会以一种低级别的方式实现再利用，但其本身并不支持再循环利用。比如连续纤维增强复合材料，尽管可以将它们切碎并用作填充物，但为了再循环利用而将纤维和聚合物分离出来的做法，显然是不经济的。大部分其他材料都希望通过添加纯净材料以避免增加不可控的杂质。因此，材料制品最终重新进入图15.4所示循环的比例，取决于材料自身以及材料所处的产品。

4. 修复

修复特指对产品或可回收零件进行整修或升级。要想使其可用，必须满足一些准则。其中之一是，产品的设计固定或产品的技术发展很缓慢，以至于修复的产品依然有一定的市场。例如住房、办公空间以及道路和铁路基础设施，这些领域都对材料有巨大的需求。

5. 再利用

再利用是对产品的再分配，将产品提供给愿意接受产品已经使用过这样一个事实的消费群体，或用于其最初的目的（例如二手车），或用于其他用途（把车改造成高速汽车，或把公共汽车改装成拖车式活动房屋）。慈善商店收集他人不要的衣服、书籍和物品，然后卖给认为这些商品还有价值的人。对于生命周期终结的产品，再利用是最为温和的方案。

15.5 生态选择

为选出对环境影响最小的材料，我们需要像15.2节那样，首先搞清楚我们所考虑的产品生命周期的哪个阶段对环境的影响最大。这样有助于我们选择合适的策略以改善对环境的影响（见图15.5）。所述策略会在下面的各章节加以详细描述。

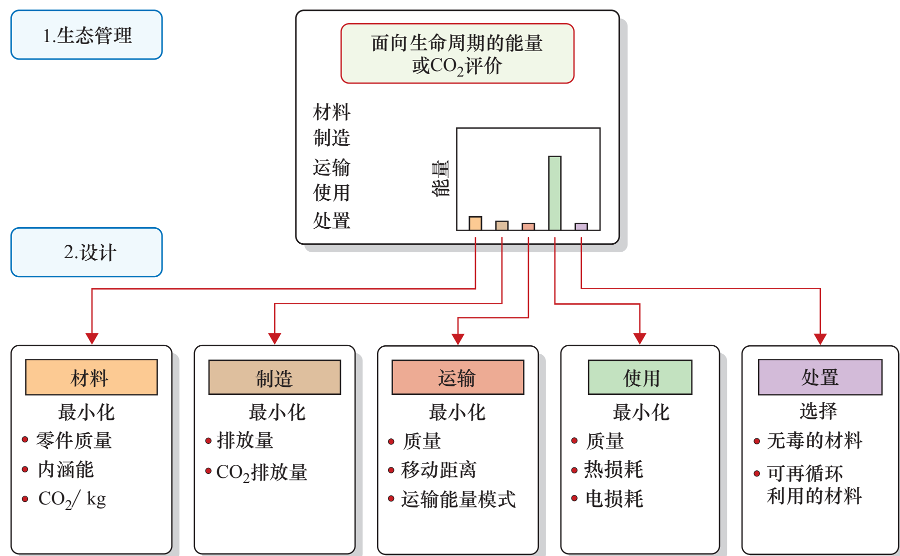


图15.5 考虑环境的理性设计起于对产品生命周期各个阶段的分析以明确目标阶段，进而确定选择方法，使得该阶段对环境的影响降到最低

1. 材料生产阶段

如果材料生产是产品生命周期的主要影响阶段，那么这是第一个目标。图15.6所

示的饮料瓶就是这样一个例子。材料和能量的消耗主要发生在材料提取和生产过程中，而非之后的环节。运输和冷藏除外，因为它们消耗的能量很少。我们以材料（内涵能见表 15.2）提取和精炼过程中消耗的能量为度量，将 CO_2、NO_X 和 SO_X 的排放量与之建立相应的关系，尽管这种关系的建立并不那么简单。假定生产 1kg 材料所消耗的能量是 H_p，那么单位体积消耗的能量为 $H_p\rho$。其中，ρ 是材料的密度。

图 15.7 和图 15.8 所示的柱状图给出了对应陶瓷、金属、聚合物和复合材料的上述两个物理量值。图 15.7 以“每千克”为基准。玻璃是第一个容器的材料，其内涵能最低；钢稍微大一点；聚合物的内涵能比钢要大得多；铝和其他轻金属的内涵能是所有材料中最高的。同样的材料，当以“每立方米”为基准（见图 15.8）进行对比时，相应的结果会有所变化。玻璃的内涵能仍然是最低的，但通用高分子材料（如 PE 和 PP）的内涵能要比钢来的小；复合材料 GFRP 仅仅比钢稍高一点。不过，以“每千克”或“每立方米”为基准所进行的比较是正确的吗？并非如此。为妥善处理材料生产阶段对环境的影响，我们必须寻求能量消耗、CO_2 排放量或“功能单元”生态指标的最小化。



图 15.6 液体容器：玻璃、PE、PET、铝和钢（所有材料都能再循环利用。哪种材料的内涵能最低？）

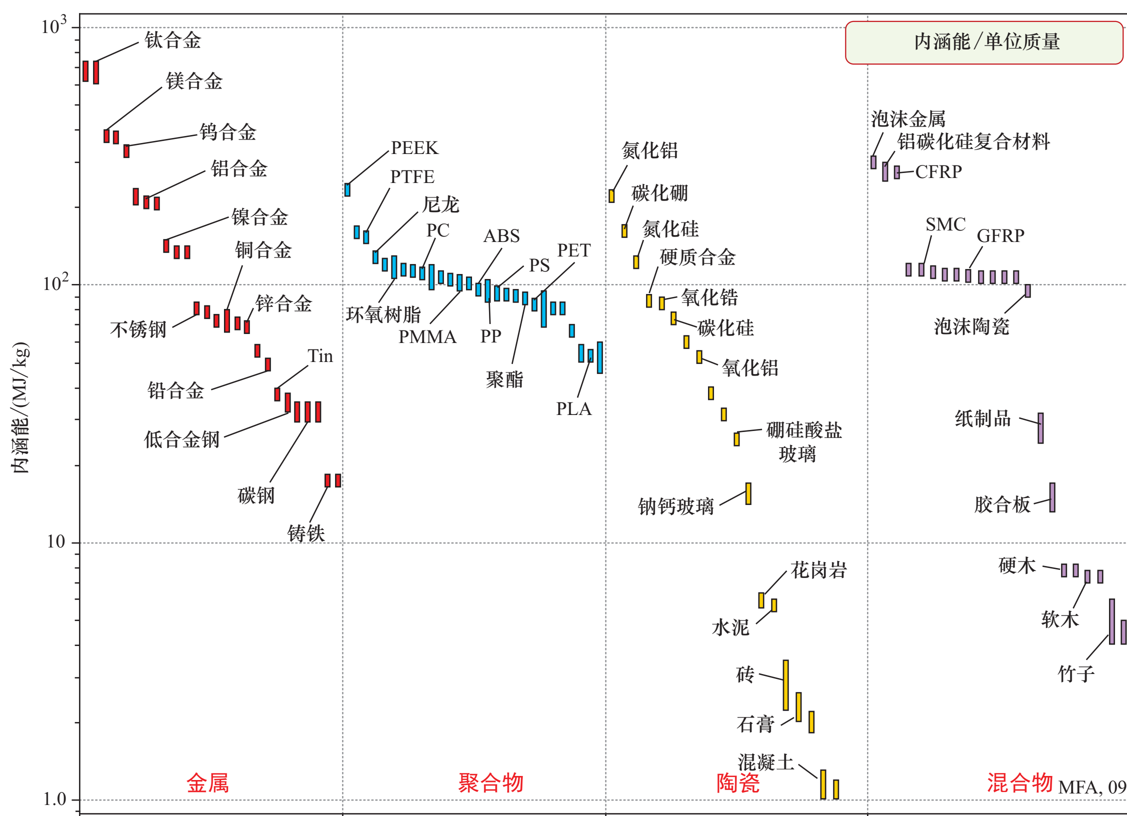


图 15.7 单位质量材料的内涵能（数据见附录 A）

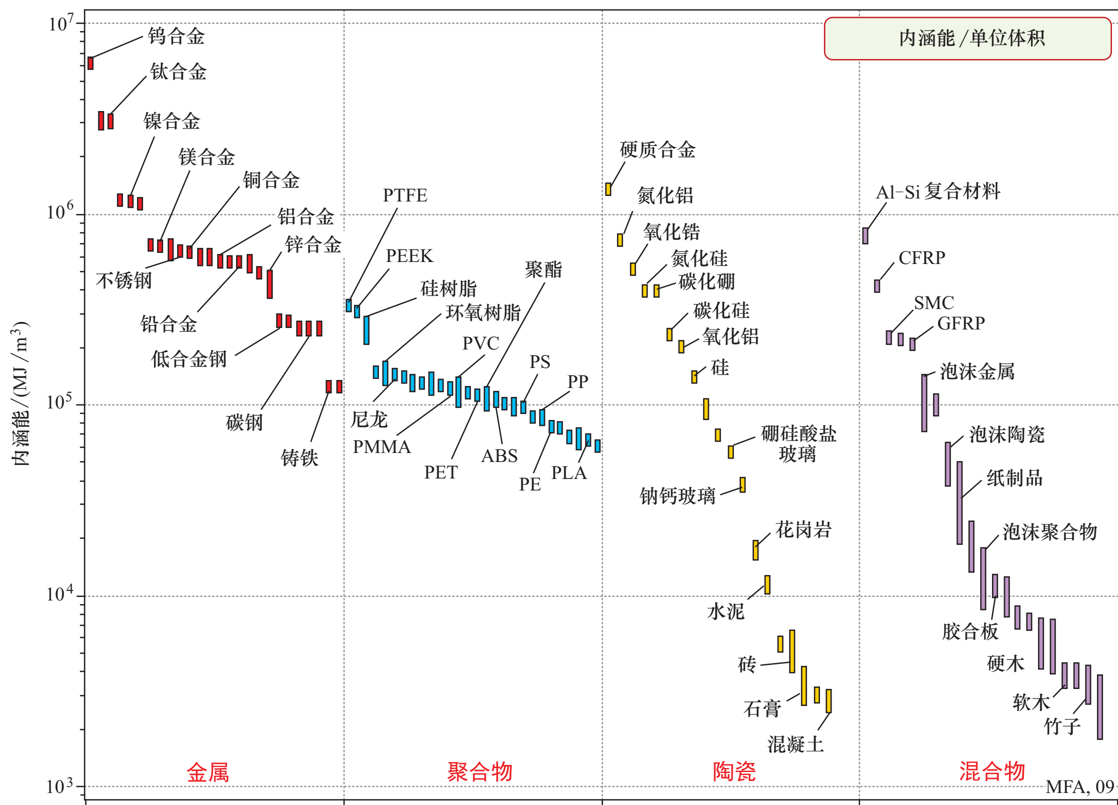


图 15.8 单位体积材料的内涵能

包含能量成分的性能指标的推导方式与重量以及成本的性能指标的推导方式完全一致（见第 5 章）。举例说明，为梁选择一种材料，使梁满足刚度约束的同时能量消耗最小。重复第 5 章的推导过程，但是以内涵能最小化而非质量最小化为目标，以此可得到相应的性能方程和材料指标。相应的材料指标只需将第 5 章对应指标中的 ρ 用 $H_p\rho$ 替代即可。因此，在给定梁的刚度和长度的情况下，使得内涵能最小的最佳材料对应材料指标 M_1 的值最大。

$$M_1 = \frac{E^{1/2}}{H_p\rho} \tag{15.7}$$

式中，E 是梁材料的弹性模量。内涵能最小的刚性杆的最佳材料是对应 $E/H_p\rho$ 值最大的材料；刚性板的最佳材料对应 $E^{1/3}/H_p\rho$ 值最大的材料。

对于强度，可采用相同的方法来处理。给定抗弯强度的梁，使得内涵能最小的材料对应的 M_3 值最大。

$$M_3 = \frac{\sigma_f^{2/3}}{H_p\rho} \tag{15.8}$$

式中，σ_f 是梁材料的失效强度。其他指标也遵循类似的方法。

图 15.9 和图 15.10 是一对图，用于单位功能内涵能 H_p 最小化问题的材料选择（利用 CES Edu 软件可生成针对 CO_2 排放量的类似图）。第一张图给出了弹性模量 E 和 $H_p\rho$ 之间的关系，图中标注了三种常用性能指标的基准线。第二张图给出了强度和 $H_p\rho$

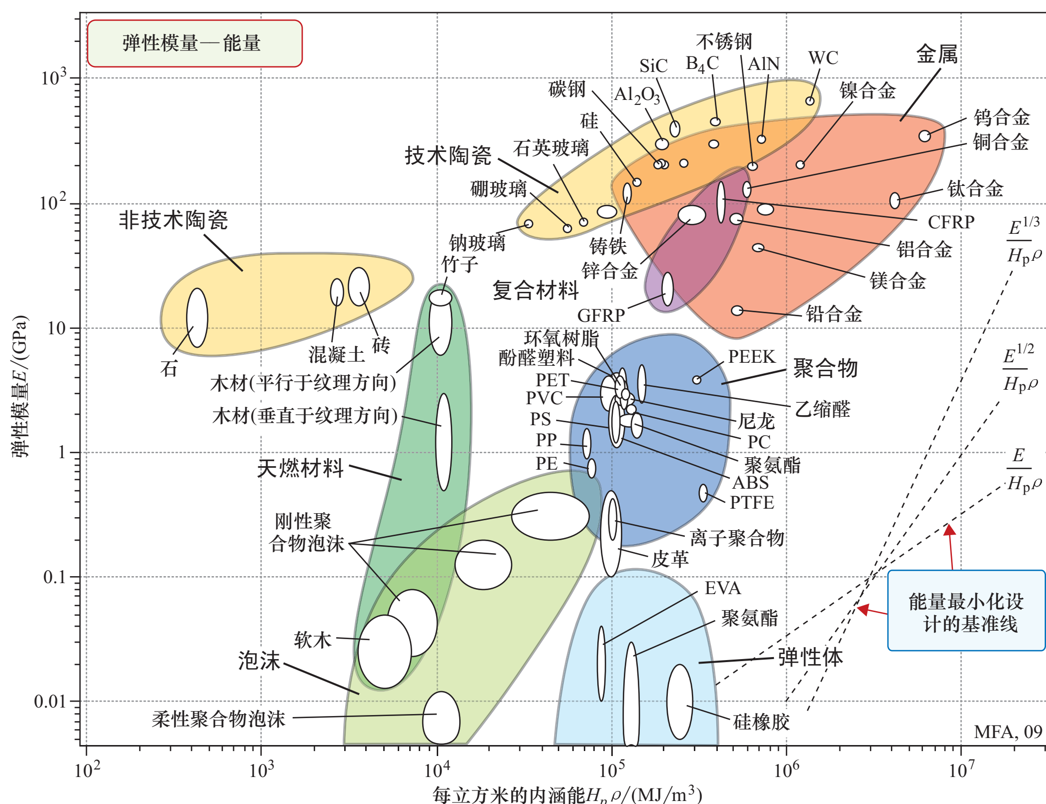


图 15.9 材料选择图表，用于最小内涵能目标下的刚度设计（使用方式与图 4.3 一致。）

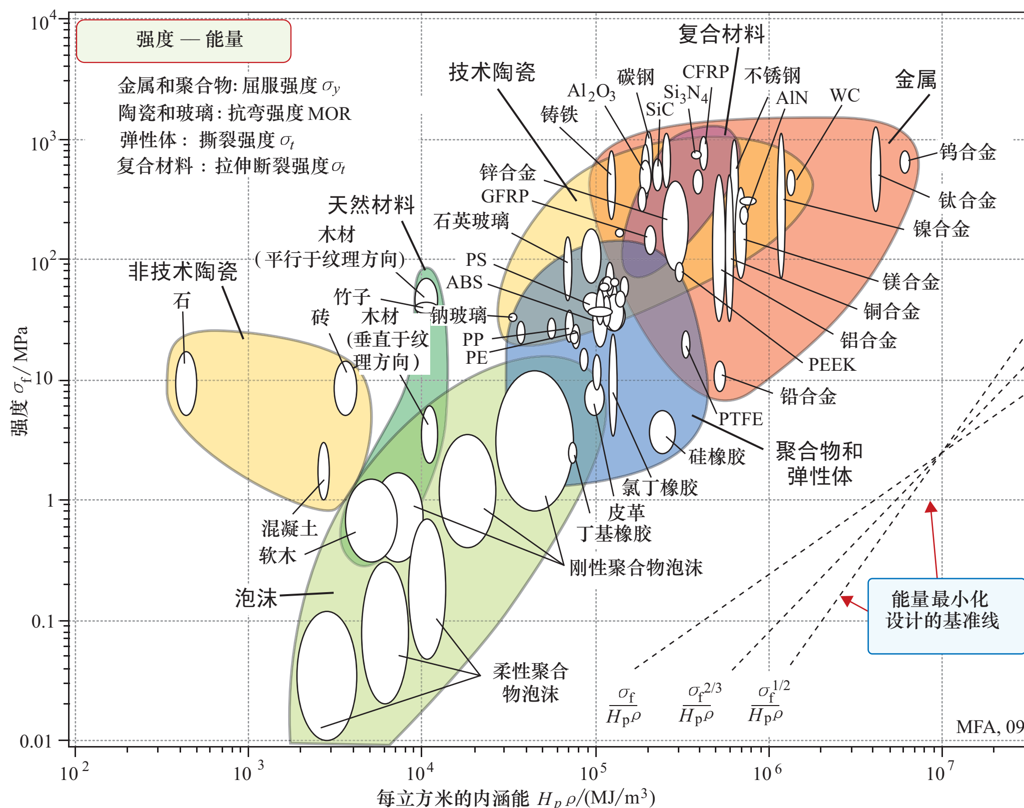


图 15.10 材料选择图表，用于最小内涵能目标下的强度设计（使用方式与图 4.4 一致。）

之间的关系，图中同样标注了常用性能指标的基准线。它们的用法与最小质量设计中的 E-ρ 和 σ_f-ρ 图表的用法一样。

大多数聚合物都是由石油加工而来，由此引发了一种能源危机论，暗示聚合物的未来堪忧。图 15.9 和图 15.10 给出了弯曲条件下，单位功能内涵能的分布情况。由图可知，大多数聚合物的内涵能比原铝、镁或钛要来得低，有些甚至能与钢相媲美。诸如钢、铝和镁等金属的生产所消耗的大部分能量主要用于从矿石中提取金属元素，所以这些材料在再循环利用时，所需的能量较少。对于能源的节约来说，有效回收和再循环利用尤为重要。

2. 产品制造阶段

正如我们之前所讨论的那样，材料的成形需要能量。显然，在制造过程中，节约能量非常重要。但是，人们似乎更加重视制造过程中排放物和有毒废物的局部影响，而这很大程度上取决于局部环境。例如，造纸要使用大量的水。历史上，很多河流系统都被造纸所产生的废水所毁灭，这些废水中含有碱金属和微粒污染物质。如今，最好的造纸厂可以做到排出的水与使用之前的水一样的纯净。有些发展中国家的生产场所存在严重的污染，而在其他地方使用先进方法生产同类产品的生产场所则不存在被污染的情况。绿色制造在这里是重要的议题。

3. 产品使用阶段

产品在使用阶段对生态的影响与材料自身的内涵能没有任何联系。确切地说，将生态影响最小化往往会对使用能量起到相反的效果。使用能量取决于力学、热学和电学方面的转化效率，基于这些转化效率的最大化可实现使用能量的最小化。运输系统的热效率（以 MJ/km 来度量）与交通工具自身的质量息息相关，由此目标转变为质量的最小化。冷藏或加热系统的能量效率是通过最小化传入或传出系统的热通量来获得的，因此目标转变为导热系数或热惯量的最小化。发电、传输和转换过程中的能量效率是通过最小化导体中的电阻损耗而获得的，由此目标转变为在满足对强度、成本等必要约束条件下的电阻最小化。在本书前面几个章节中，我们已详细讲述了如何针对这些设计目标进行材料选择。

4. 产品报废阶段

产品生命周期的最后一个阶段对环境的影响有很多方面。如今，越来越多的法律法规对处理过程、回收和再循环利用的要求做了规定，并且通过征收垃圾填埋税以及补贴再循环利用的方式，驱使市场力量决定生命周期终止的选择。

15.6 案例分析：饮料瓶和防撞护栏

15.6.1 饮料瓶

图 15.6 所示的容器，属于在第一和第二阶段（材料生产和产品制造阶段），消耗大部分能量及产生大部分排放物的产品。因此，需针对这两个阶段进行材料选择从而使能量消耗、气体和颗粒排放最小化。表 15.3 给出了相应的设计要求。

表 15.4 和表 15.5 列出了五种容器类型的质量、所用的材料和各自特定的内能。它们的产品涉及模压成型或变形，对应的能量也都列在表中。所有这五种材料都能再循

环利用。哪种容器类型的单位液体总能量损耗最小呢？

表 15.3 容器的设计要求

功能	清凉饮料容器
约束条件	必须可再循环利用
目标	单位容量内涵能最小
自由变量	材料选择

表 15.4 容器的细节

容器类型	材料	质量/g	质量/(g/l)	能量/(MJ/l)
400ml 装 PET 瓶	PET	25	62	5.4
1l 装 PE 奶瓶	高密度 PE	38	38	3.2
750ml 装玻璃瓶	钠玻璃	325	433	8.2
440ml 装铝罐	5000 系列铝合金	20	45	9.0
440ml 装钢罐	普通碳钢	45	102	2.4

表 15.5 容器材料数据（来源于附录 A）

材料	内涵能/(MJ/kg)	成型方法	成型能量/(MJ/kg)
PET	84	模压成型	3.1
PE	81	模压成型	3.1
钠玻璃	15.5	模压成型	4.9
5000 系列铝合金	210	拉深	0.13
普通碳钢	32	拉深	0.15

由表 15.5 给出的能量对比可以看出，容器成形所消耗的能量总是比第一阶段生产材料所消耗的能量要少。只有在玻璃容器这个案例中，成形所消耗的能量所占比重才较为显著。因此，能量消耗的主要阶段是材料生产阶段。表 15.4 的最后一列给出了每一种材料的两类能量之和与每公升容量容器质量的乘积。对比可知，钢的能量损失最小，玻璃和铝的能量损失最大。

15.6.2 防撞护栏

道路上用于保护驾驶人和乘客的护栏有两类。一是静态护栏，如高速公路中心的隔离栏；二是移动护栏，如车辆本身的保险杠（见图 15.11）。道路上静态类型的护栏有数以万计千米长。一旦准备就绪，它们就不会再消耗能量、产生 CO_2，并且可以使用很长时间。从图 15.1 所示产品的生命周期的角度来看，它们生命周期的主导阶段是材料生产阶段和产品制造阶段。相比之下，保险杠作为汽车的一部分，增加了汽车的重量，由此也增加了能量消耗。

本例的主要阶段是产品使用阶段，意味着如果以生态设计为目标，两种护栏材料的选择标准是不一样的。对于第一类护栏，我们以护栏所吸收的单位生产能量最大化为标准；对于第二类护栏，我们将单位质量吸收的能量作为标准。表 15.6 对此作了总结。

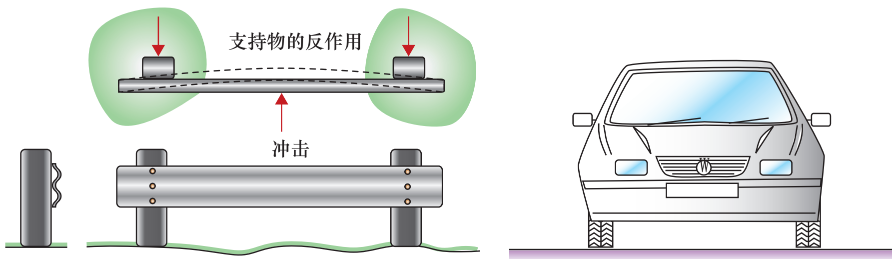


图 15.11 两类防撞护栏：一类是静态的，另一类随着物体动态移动，如保险杠（对于不同的防撞护栏类型，选择材料的标准不同。）

表 15.6 防撞护栏的设计要求

功能	吸能防撞护栏
约束条件	必须可再循环利用
目标	护栏所吸收的单位生产能量最大化或单位质量吸收的能量最大化
自由变量	材料的选择

在冲击过程中，防撞护栏主要承受弯曲载荷（见图 15.11）。它的功能在于将一点的冲击能转移到支撑结构上，由基座支撑住或吸能元件吸收掉。为此，防撞护栏的材料必须具有足够高的强度 σ_f 和足够的韧性，同时能被再循环利用。静态护栏必须满足这些约束条件，以最小化内涵能为设计目标，这样可以有效减少整个生命周期的能量。由 15.5 节可知，所选择的材料必须对应大的材料指标 M_3 值。

$$M_3 = \frac{\sigma_f^{2/3}}{H_p \rho} \tag{15.9}$$

式中，σ_f 是屈服强度；ρ 是材料密度；H_p 是每千克材料的内涵能。对于汽车保险杠，质量是主要问题，而非内涵能。如果我们把目标调整为质量最小化，所选择的材料应对应大的材料指表 M_4 值。

$$M_4 = \frac{\sigma_f^{2/3}}{\rho} \tag{15.10}$$

图 15.10 中标注了上述材料指标，以帮助我们进行材料选择。我们暂且将这张图放在一边，先来看看将这些指标简单绘制成柱状图的形式，会带来些什么样的信息。图 15.12 和图 15.13 给出了金属、聚合物和聚合物基复合材料的结果。图 15.12 用于指导静态护栏的材料选择。由图可知，在给定承载能力的情况下，由碳钢、铸铁或木材做成的护栏其内涵能最小，这是其他材料都无法相比拟的。图 15.13 用于指导动态护栏的材料选择。CFRP（如连续碳纤维增强环氧树脂）在比强度方面表现优越，但它不可再循环利用。镁、钛和铝稍微重一些，但可再循环利用。在第一张图中表现较差的聚合物，此时反而成了候选材料。即便不加以强化，它们的表现也与钢基本相当。

3. 附言

图 15.11 左图是金属防撞护栏的一种外形。曲率的增加使得截面的惯性矩得以增大，从而增加了弯曲刚度和强度。这是一个耦合材料选择以及截面形状（可参阅第 9 章 9.5 节）以实现最优化设计的例子。

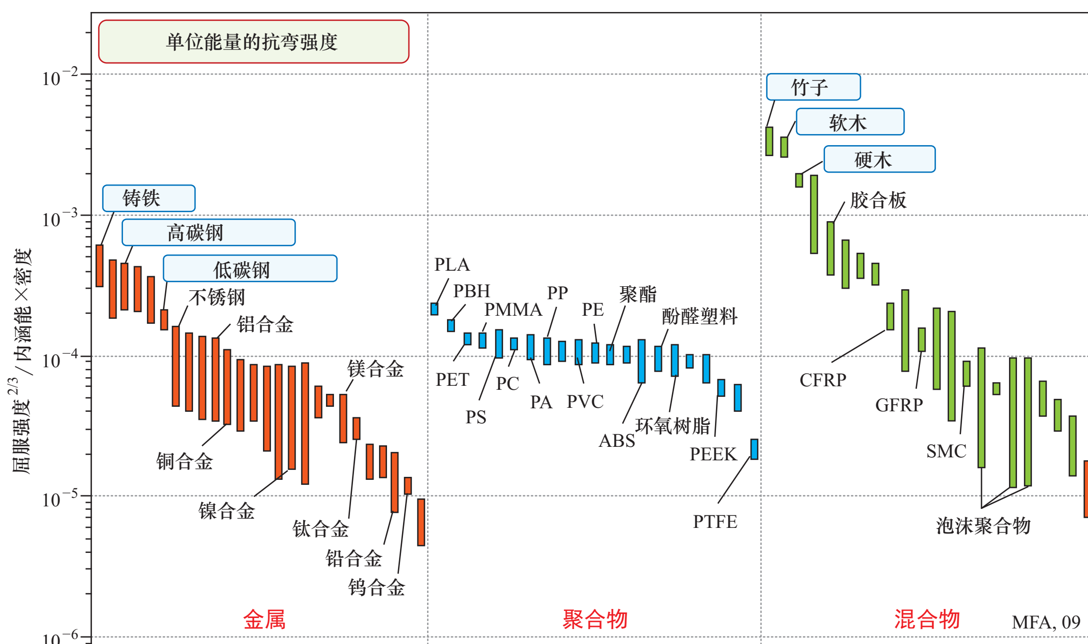


图 15.12 静态护栏的材料选择（铸铁、碳钢、低合金钢和木材都是最佳选择。）

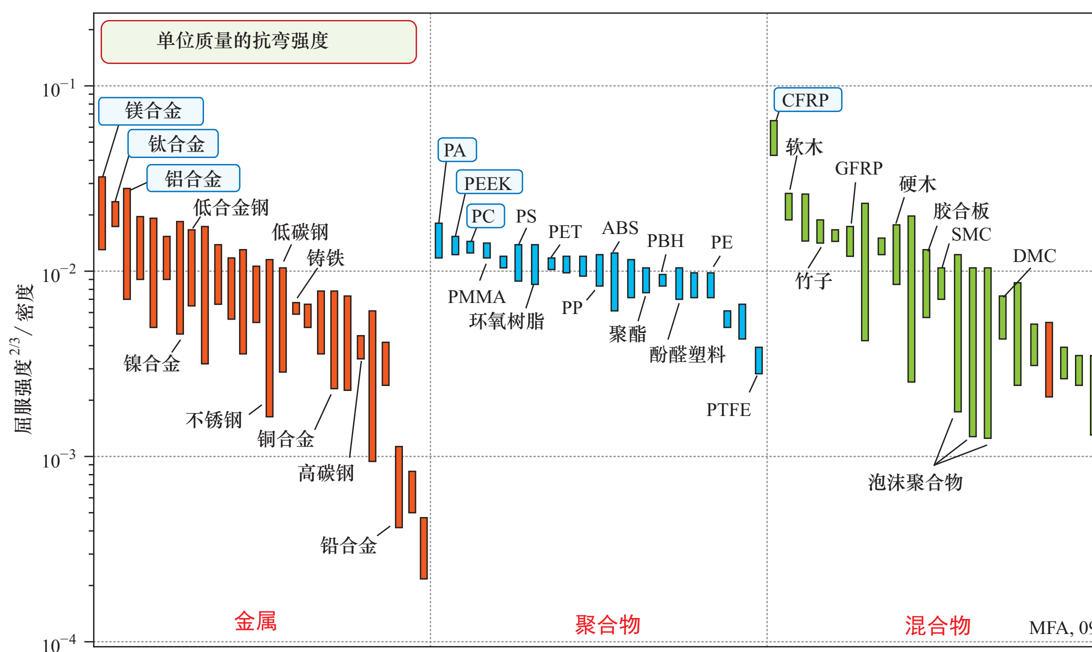


图 15.13 移动护栏的材料选择（CFRP 和轻合金可实现最佳性能；尼龙和聚碳酸酯的性能表现与钢相当。）

15.7 本章小结

为实现环境目标，要想做出理性的材料选择，需首先明确产品生命周期的哪一个阶段才是问题的关键，是材料生产阶段、产品制造阶段、产品使用阶段还是产品报废

阶段。为此，我们不仅需要相应的生态性能（如能量、CO_2 和其他排放物、毒性以及再循环利用的能力），还需要力学性能、热性能、电性能以及化学性能。因此，如果材料生产阶段是所关心的阶段，那么材料的选择应基于最小化生产能量或相关联排放物（如 CO_2 排放量）的目标来进行。如果是产品使用阶段是所关心的阶段，那么材料的选择应基于轻质以及优异的热绝缘体或导电体（同时需满足刚度、强度和成本等约束）的目标来进行。

本章围绕上述问题，给出了相应的方法。当以软件形式来实施时，该方法最为高效。本书第 5 章、第 6 章、第 13 章和第 14 章所提及的 CES Edu 系统，包含了材料的生态性能数据库，且内含的生态管理工具可按照图 15. 3 所示的方式对产品的全生命周期进行分析。

如果对本章的内容感兴趣，想要阅读更多的内容，可以阅读下一节扩展阅读列表中的第一本书。书中对本章节的一些思想进行了更为详细全面的描述。

15. 8 扩展阅读

1）Ashby, M. F. (2009). *Materials and the environment*. Butterworth-Heinemann, ISBN 978-1-85617-608-8.

一本教材，介绍了背景、方法和数据，以此来深入探讨与材料相关的环境问题。

2）CES Edu（2010）. *The Cambridge Engineering Selector*. Granta Design.

材料选择平台，现在提供了一个可选的生态化设计的模块。www. grantadesign. com

3）Fuad-Luke, A. (2002). *The eco-design handbook*. Thames and Hudson, ISBN 0-500-28343-5.

一本非常好的关于案例、想法和生态化设计材料的原始资料。

4）Goedkoop, M. J., Demmers, M., & Collignon, M. X. (1995). *Eco-indicator '95 manual*. PRé Consul-tants and The Netherlands Agency for Energy and the Environment, ISBN 90-72130-80-4.

5）Goedkoop, M., Effting, S., & Collignon, M. (2000). *The Eco-indicator 99: A damage oriented method for life cycle impact assessment*. Manual for Designers.

PRe Consultants 在推销一款重要的生命周期分析软件，他们是生态指标方法的坚定拥护者。

6）ISO 14001 (1996) and ISO 14040 (1997, 1998, 1999). Environmental management system-specification with guidance for use. International Organization for Standardization (ISO), Geneva.

7）Kyoto Protocol (1997). Environmental management—life cycle assessment (and subsections). Framework Convention on Climate Change, Document FCCC/CP1997/7/ADD. 1. United Nations, Geneva.

一份与发达国家签订的相对于 1990 年排放标准的二氧化碳排放限制协议。美国同意在 2008—2012 年间降低排放量达 1990 年标准的 7%。欧洲国家采用了更为严苛的协议。

8）Lovins, L. H., von Weizsäcker, E., & Lovins, A. B. (1998). *Factor four: Doubling wealth, halving resource use. Earthscan*, ISBN 1-853834-068.

一本有影响的书籍，主张能源生产率可以提升 4 倍。也就是说，从每单位自然能源所提取的财富也是 4 倍，使得整个世界可以在减少一半能源使用的情况下依然享有两倍舒适度的生活。

9）MacKay, D. J. G. (2008). *Sustainable energy—without the hot air*. Cambridge University: Department of Physics, *www. withouthotair. com/*.

在关于能源及其使用的讨论中，MacKay 提出了一种受欢迎的常识，即新鲜空气替代热空气。

10）Mackenzie, D. (1997). *Green design: Design for the environment* (2nd ed.). Lawrence King Publishing, ISBN 1-85669-096-2.

一本丰富的关于建筑、包装和产品生态化设计的案例集。

11） Meadows, D. H., Meadows, D. L., Randers, J., & Behrens, W. W. (1972). *The limits to growth—1st report of the club of Rome*. Universe Books, ISBN 0-87663-165-0.

一篇关键的发表物，警告了全世界能源枯竭的可能性，但是其中用到的数据受到了质疑。尽管如此，它仍然是后续学习的触发剂，且其观点被越来越多的人所接受。

12） Schmidt-Bleek, F. (1997). *How much environment does the human being need—factor* 10—*the measure for an ecological economy*. Deutscher Taschenbuchverlag.

作者认为真正的可持续性发展需要降低发达国家的能源和资源使用率至 10%。

13） Wenzel, H., Hauschild, M., & Alting, L. (1997). *Environmental assessment of products*, *Vol.* 1. Chapman and Hall, ISBN 0-412-80800-5.

Alting 教授在领导丹麦的生态化设计研究。

第 16 章

材料与工业设计





图 16.0　这两辆车的动力和价格都相同，但两者的式样、舒适度和复杂程度都不尽相同（那么它们是如何在同一个市场中进行竞争的呢——竞争的立足点在于美学、联想和感知层面。）

16.1　引言

好的设计可以达到预期的效果，但优秀的设计令人愉悦。

这种愉悦源自形式、颜色、质地、感觉，以及它们所触发的关联。愉悦的设计本身就是一个故事。通常来说，诚实的表达比欺骗更令人满意，尽管怪诞幽默的设计同样具有吸引力。

材料在设计中扮演着重要的角色。引入新材料的一个主要原因是，新材料能给设计提供更大的自由度。在 20 世纪，金属造就了很多之前无法实现的建筑物。由铸铁建成的水晶宫殿、锻铁建成的埃菲尔铁塔以及冷拉钢索建成的金门大桥，都透着不容置

疑的美。聚合物有着明亮的颜色、令人满意的质地以及广阔的成形自由度；它们开启了很多新的设计形式，在家用电器中我们可以找到很多出色的案例，如食品搅拌器、吹风机、手机、MP3播放器和真空除尘器。设计者们富有想象力地将材料应用在各种设计中，新颖的样式、舒适的触感以及多变的外形无不使人心情愉悦。

那些关注于工程审美维度的设计师们被人们称为“工业设计师”，但人们对这项职业的认识还是有点混乱。本章我们将首先介绍一下工业设计的几个观念，着重强调材料在其中的角色。随后以案例的形式结束本章。在开始本章内容前，我们先给大家提个醒。

早先的章节都是采用系统的方法来进行材料和工艺的选择。所谓“系统的”意味着不管是你来操作还是我来操作，基于相同的步骤我们所得到的结果是完全一致的，不会随着时间的变化而发生变化。从这个角度来说，工业设计不是系统的。成功源自对时尚、顾客以及教育背景的敏感度，并且受到广告和关联的影响，甚至是操控。本章的观点部分源自我认为明智的作家，部分观点源自我本人。或许你会不同意我的观点，但只要能让你开始思考设计如何带来愉悦，那么本章的目的也就达到了。

本章的观点在扩展阅读的第一本书籍中作了细致的阐述。

16.2 需求金字塔

我写这一章所用的笔价值5美元（见图16.1上图）。如果你去对了商店，你可以找到价值超过1000美元的笔（见图16.1下图）。这支笔的书写效果会比我那支好200倍吗？不太可能，我的笔已经非常好。然而，昂贵的笔依然有其市场，这是为什么呢？

产品具有成本属性，它是产品生产和营销所产生的花费。产品具有价格属性，用于提供给消费者。同时，产品具有价值属性，是消费者对产品的度量。昂贵的笔之所以会设定高昂的价格，是基于消费者对其价值的认可。那么，价值由什么来决定呢？主要有三个方面。



图16.1 便宜的笔和昂贵的笔（上面两支笔使用的材料是丙烯酸塑料，而下面两支笔使用的材料是金、银和搪瓷。材料的选择增加了笔的美学和关联。）

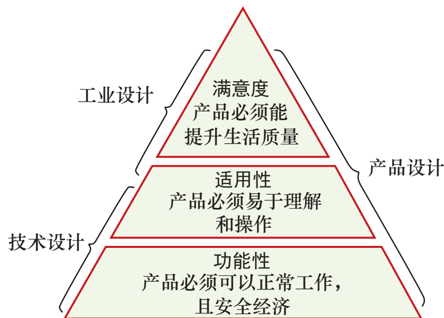


图16.2 需求金字塔（金字塔的下半部分称为“技术设计”，上半部分称为“工业设计”，意味着这是两个不同的活动。但是，在产品设计过程中，最好将所有三层视为一个整体。）

功能性显然是很重要的一个方面。图16.2所示的需求金字塔就是以它为基础。产品必须能正常工作，且安全经济。当然，单纯满足功能需求是不够的。产品必须易于理解和操作，这就涉及适用性的问题，属于需求金字塔的第二层。金字塔的顶端是产品满意度方面的需求，用以提升消费者的生活质量。

产品的价值是从功能性、适用性和满意度三个方面，对产品满足消费者期望值的一种度量。如果将其视作一种产品，它的特性与人类非常接近。令人满意的特性是运行良好、沟通高效且能给公司带来效益。令人反感的特性是上述任意一点都没有做到。令人讨厌的特性是表现得异常乏味以至于你不想再接近它们。

产品也是如此。图 16.1 中的笔都运行良好，且很容易使用。价格方面的巨大差异，意味着下面两支笔在满意度方面有所考虑，而上面两支笔则没有。一个很明显的差别是它们各自的材料选择。上面的两支笔采用的是模压成型的丙烯酸塑料，而下面的两支笔采用的是金、银和搪瓷。丙烯酸塑料是牙刷手柄的常用材料，用完后就会扔掉。金和银常用于昂贵首饰，与精工细作和代代相传的传家宝有所关联。好了，这只是众多不同之处中的一小部分。如何去发现其他不同点，我们需要回答这样一个问题，即：什么创造了产品的特性？

16.3 产品特性

图 16.3 给出了一种剖析产品特性的方法，图中满是各类想法等待我们去探索。如同所有的地图一样，图中包含了很多的细节，从中我们需要寻找到我们的出路。图的

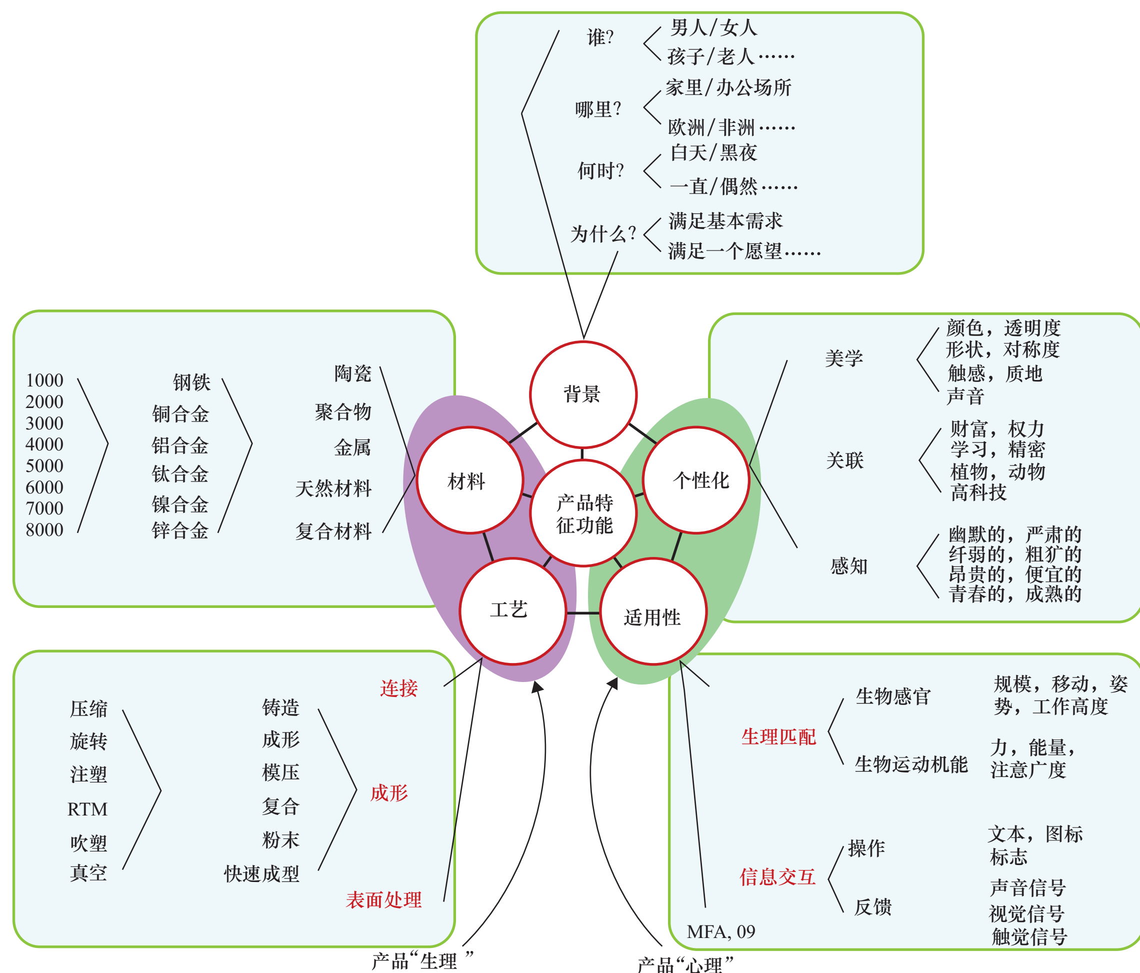


图 16.3 产品特性的分解（“背景情况”对应意图或心境；材料和工艺创造了产品的骨肉之躯；用户界面决定了适用性；产品的美学、关联和感知造就了个性。）

中央是产品自身的一些信息，包括基本的设计需求、功能以及特征。如何思考和利用这些信息，取决于不同的背景情况。通过回答图中最上方矩形框内的问题（谁？哪里？何时？为什么？），我们可以设定相应的背景情况。首先我们来看第一个问题：谁？设计师针对一款女性产品所做的选择，与一款面向儿童或老年人或运动员的产品所做出的选择会完全不一样。紧接着，第二个问题：哪里？在家里使用的产品和在学校或者医院使用的产品，对于材料的选择会截然不同。再接着，何时？偶尔使用的产品与经常使用的产品，正式场合使用的产品与非正式场合使用的产品，其设计方式都不尽相同。最后一个问题：为什么？本着功利心态设计的产品，在设计过程中所做出的很多决定，在设计有生活品位的产品时根本不会出现。因此，设计师在找寻解决方案的过程中所做的所有决定都受到背景情况的影响和限制。

图 16.3 中产品圆圈的左侧给出了材料及其成形、连接以及精饰工艺的一些信息，并且提供了对应的数据库，可以从中做出选择。数据的呈现采用本书第 3 章中提及的系列、类和成员的结构来完成。迄今为止，从数据库中选出材料及其工艺以提供功能性是本书的主题。可以说，材料及其工艺使得产品具备了形与肉，创造了产品“生理”。

图 16.3 的右侧包含了两组信息。底下是适用性信息，描述了产品与用户之间的沟通方法，包括感官、认知以及运动机能方面的互动。产品的成功依赖于一种尽可能直观的操作模式，无须用户付出额外的努力。此外，一种可视的、可听的或可触及的用户交互界面也至关重要。不计其数的产品忽略了这方面的需求，由此流失了很多潜在的用户。如今，人们在这方面的意识越来越强，从而引发了包容性设计方面的研究，即设计出的产品应被大部分人群所接受。

剩下的一组信息被标识为个性化信息。产品的个性化源自美学、关联以及感知。下面我们来解释一下这三个词。

麻醉剂会使人们的感觉变迟钝，美学则恰好相反。它们可以激励五种感觉，包括视觉、听觉、触觉、味觉和嗅觉，并且借助这些感觉来刺激大脑。个性化信息包的第一行详细说明我们所关心的方面，即色彩、形状、质地、触感和声音。想象下一辆新车，它的样式、气味以及关门的声音，而且不允许任何意外事件发生。对此，汽车制造商需要花费上百万来实现上述目标。

个性化信息包的第二行对应产品的关联。关联是产品令你想起的或暗示你的那些事物。路虎以及其他的 SUV 通常会模仿军用车辆的形状和颜色。20 世纪 60 年代和 70 年代美国车所采用的流线型与航空航天相关联。大众的甲壳虫汽车形似甲壳虫可能是一种意外，但其他很多产品并非如此。它们是设计师们的精心设计以吸引该产品的目标消费群体。

最后，感知是最为抽象的一种性质。感知是观察者由产品诱导所产生的反应。对于这点，存在一定的争议。对于产品的感知会随着时间的推移而发生变化，并且依赖于观察者的教育程度和背景。然而，在最终的分析中，感知是促使消费者在一大堆相似的模型中选择这个而非其他的原因，会使人产生“非买不可”的感觉（查看图 16.0）。表 16.1 列出了很多感知及其对立面，以便于充分理解它们的含义。这些词源自于产品评论以及一些专业的产品设计类杂志，组成了产品特性交流词汇表的一部分。

表 16.1 产品的一些感知属性

感知(及其对立面)	
积极的——消极的	奢华的——朴素的
便宜的——昂贵的	女性化的——男性化的
经典的——潮流的	正式的——非正式的
不带感情的——友好的	手工的——量产的
聪明的——愚蠢的	诚实的——欺骗的
普通的——高级的	幽默的——严肃的
装饰的——简朴的	
纤弱的——粗犷的	惹人厌的——可爱的
一次性的——持久的	
迟钝的——性感的	成熟的——青春的
优雅的——繁杂的	复古的——未来的

16.4 利用材料与工艺创造产品个性

材料自身具有个性吗？有一个思想学派信奉的中心教义是，材料必须诚实地加以使用。这意味着欺骗和隐瞒是不可接受的，材料必须在展现其固有性质和天然表面的方式下进行使用。这种观点植根于传统工艺，如陶工对于黏土和釉彩的使用、木匠对于木料的使用，以及银匠和玻璃工人在手工制作精美物品的过程中，都是利用了材料的独特性能以及它们与工艺的集成性。

这是一种值得尊敬的观点，但并非是唯一。设计的整体性是消费者所关注的特性，但与此同时他们还关注其他特性，如幽默、共鸣、惊讶、刺激，甚至震惊。你不必特地去寻找具有这类特性的产品，这类特性通常是以欺骗的方式来使用材料而获得。聚合物往往是以这种方式使用，由其合用性决定。当然，从某种程度上来说，这是个定义问题。如果将聚合物模仿其他材料的能力作为其特征属性，那么这种使用方式也是诚实的。

16.4.1 材料和感官：美学属性

美学属性与感官相关联，包括触觉、视觉、听觉、味觉和嗅觉（见表 16.2）。几乎人人都认为：金属生冷；软木塞温暖；酒杯撞击时，丁丁响；白蜡杯听起来没精打采，甚至死气沉沉的。乍看起来，聚苯乙烯水杯与玻璃杯没什么不同，但拿起来后会发现：它质地更轻，不冷也不硬，拍打它发出的声音也不同。这会让人产生一种感觉：它与玻璃杯是那么地不同，以至于在昂贵的餐厅它是完全不被接受的。由此可以认为，材料有着特定的美学属性。接下来让我们看看能否证实这一点。

1. 触觉：软—硬/暖—冷

钢是硬的，玻璃也是，钻石比它们都硬。硬物不易产生抓痕，事实上我们可以用它们来刮擦其他材料。这类材料通常可以高度抛光，耐磨损能力好，且耐用。材料的硬度一般用维氏硬度 H 表示。这是一个感官属性与技术属性直接相关联的例子。

表 16.2 材料的一些美学特性

感官	属性	感官	属性
触觉	温暖	听觉	听不太清的
	冷		沉闷的
	软		刺耳的
	硬		洪亮的
	柔韧		银铃般的
	坚硬		声调高的
视觉	清晰		声调低的
	透明		
	半透明		
	模糊	口味	苦的
	反向		甜的
	光亮		
	无光泽		
	不光滑		
	有织纹的		

“软”听起来是“硬”的对立面，实际上它更多地与弹性模量 E 相关，而不是硬度 H。软材料受力时会发生偏离。很小的施力，就会使其很柔软，但当力释放后，它就会恢复原形。弹性体（橡胶）摸起来很软，聚合物泡沫也是这样。两者的弹性模量介于 100MPa 到 10000MPa 之间，低于普通的“硬”固体，这是它们让人感觉软的原因。图 16.4 中我们将软到硬作为一根轴，基于$\sqrt{EH}$这个量来衡量。

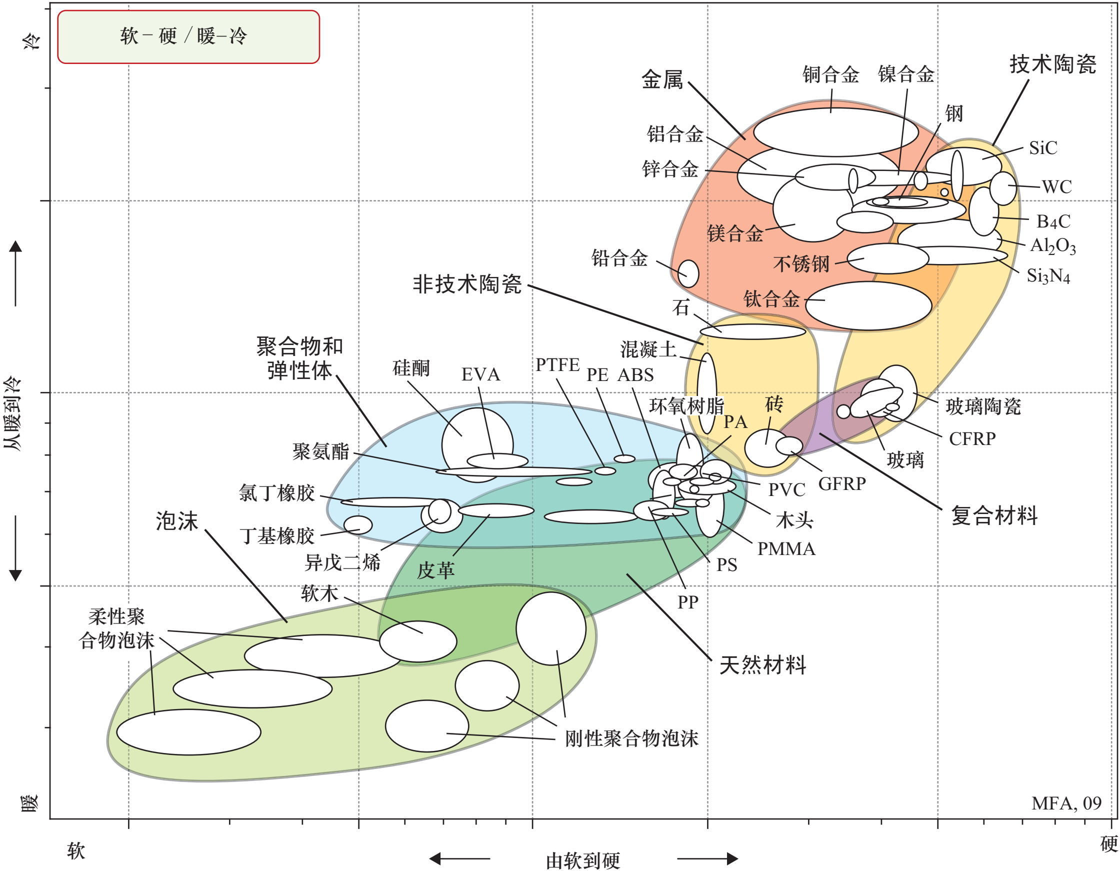


图 16.4 材料的触感（泡沫和许多天然材料的触感是软而温暖；金属、陶瓷和玻璃则是硬而冷。聚合物介于两者之间。）

之所以我们在触及材料时会感觉“冷”，是因为指尖的热量被迅速地传导走了，否则就会感觉“暖”。这与材料的导热系数 λ 以及比热容 C_p 相关。对于材料的感知冷或热的衡量可以借助$\sqrt{\lambda C_p \rho}$这个物理量来实现，对应图 16.4 所示的另一根坐标轴，很好地给出了材料的触觉属性。聚合物泡沫和低密度木材是暖而软的，巴尔杉木和软木也是如此。陶瓷和金属是冷而硬的，玻璃也是。聚合物和复合材料介于它们之间。

2. 视觉：透明性、色彩和反射率

金属是不透明的。绝大多数陶瓷属于多晶体结构，由于晶体会散射光，因而它们要么不透明，要么半透明。玻璃和一些单晶陶瓷是透明的。聚合物具有最为多样的光学透明性，从具有光学性能到完全不透光。透明性通常被描述为四能级，即：不透明、半透明、透明和无色透明。图 16.5 列出了常用材料的透明性，以价格为横轴进行绘制。最为便宜的具有光学透明性（无色透明）的材料是玻璃、PS、PET 和 PMMA。环氧树脂是透明的，但没有达到无色透明的程度。尼龙充其量也就是半透明。所有的金属、绝大多数的陶瓷和碳填充聚合物或碳纤维增强聚合物是不透明的。

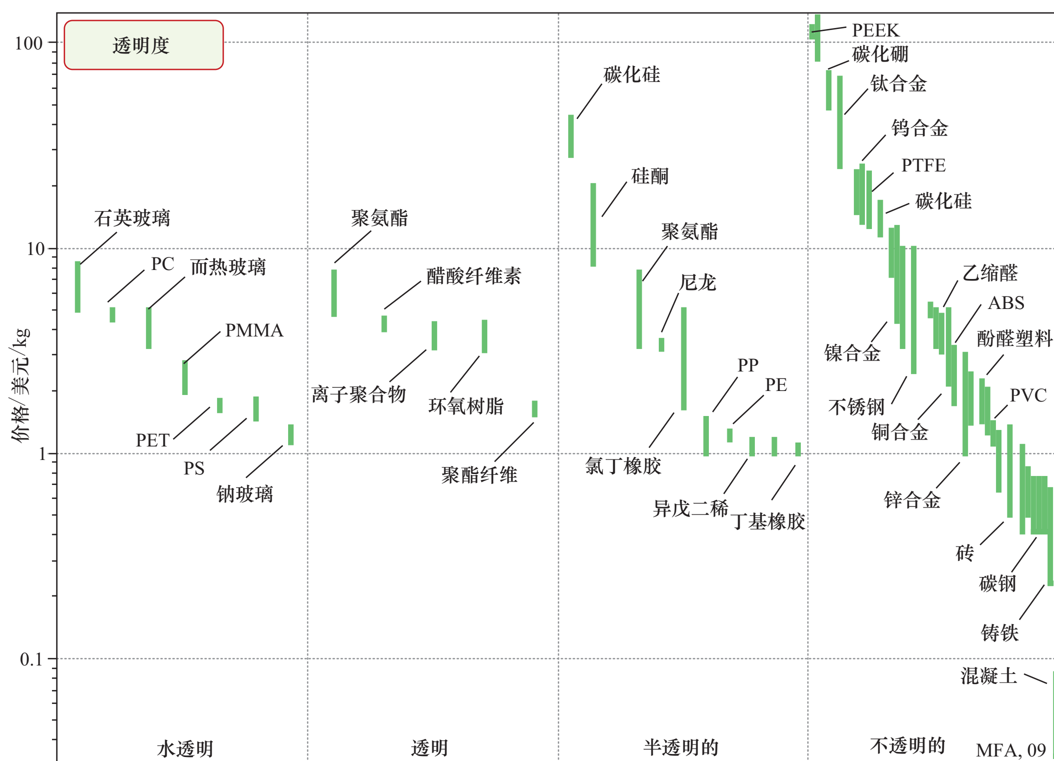


图 16.5 透明性按四点量表的方式来排列，从水透明到不透明（水透明的材料可以用作玻璃、陈列柜和透镜。透明和半透明的材料可用于传播光，但同时会散射光。不透明材料可用于吸收光。）

通过分析光谱，可以量化色彩，但对于设计者来说这帮助不大。更有效的方法是利用国际标准色卡来实现色匹配；一旦发现一种搭配，可以用每种颜色的编码来描述。最后，材料具有反射率属性，部分依赖于材料，部分依赖于材料的表面状态。类似于透明性，反射率通常也采用等级方式来描述，分为：毫无光泽、略有光泽、半光泽、光泽和镜面反射。

3. 听觉：音调和明亮度

当物体被击打时，所发出的声音频率（音调）与其材料的性能有关。它可以采用 $\sqrt{E/\rho}$ 来衡量（见图 16.6 中的横轴）。频率只是声波响应的一个方面，除此以外还有阻尼或损耗系数 η。高阻尼材料的声音听起来很沉闷且不太清楚；低阻尼材料则叮当响。声音的明亮度是阻尼的倒数，在图 16.6 中对应纵轴。图 16.6 将具有相同声学性能的材料集合在一起。从图中可以看出，青铜、玻璃和钢受到敲击时，会发出相对音调很高的声音，因此这些材料可以用来制造钟。在这个排名中，氧化铝的声音是清脆的。橡胶、泡沫和许多聚合物发出的声音听起来很沉闷，且相对于金属，它们的振动频率较低，因而这些材料常被用于消声装置。同样，铅的声音很沉闷且音调很低，它常被镀在建筑物外墙以起到隔音的效果。

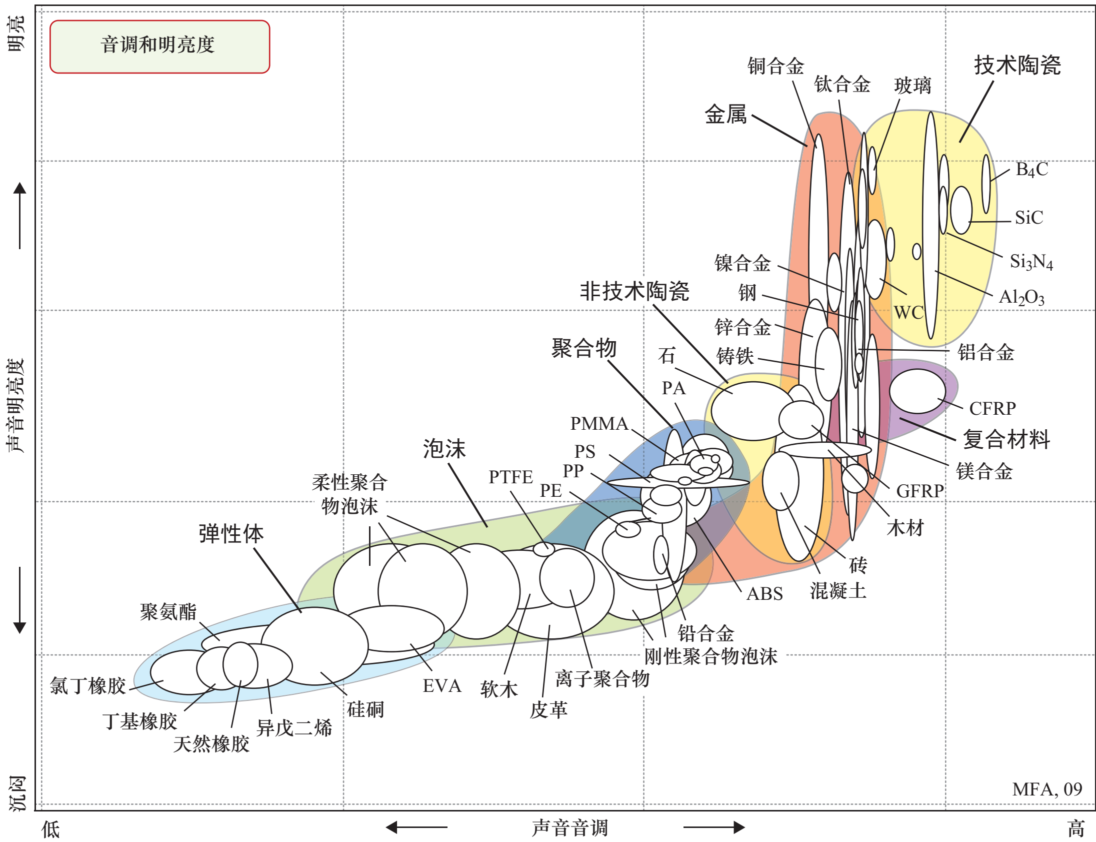


图 16.6 材料的声学性能（酒杯相互碰撞之所以叮当响，是因为玻璃是一种声音明亮的材料，而且音调高；塑料玻璃杯相互碰撞之所以发出“呼”的声音，是因为聚合物声音不明亮，而且在相同的形状下振动频率较低。右上方的材料可用来制作钟，而左下方的材料则适用于降噪。）

这三张图告诉我们，每种材料都有其特定可识别的美学特性。就陶瓷而言，它很硬，摸起来冷冷的，发出的声音音调高且明亮。金属相对硬一些，摸起来也是冷冷的，有些金属（如铜）被击打时发出的声音清脆，有些（如铅）则声音沉闷。聚合物和泡沫，最接近于天然材料，暖和、柔软，发出的声音音调低且不清晰。尽管它们中的有些具有优越的光学透光性，且几乎所有都能被染色，但是它们的硬度低，易被抓伤从

而失去光泽。

材料的这些特性造就了产品的个性。设计师在寻求产品的个性化方案时，会识别和使用材料的这些特性，并延续到产品本身。一块不锈钢仪表盘，无论它是用于汽车，还是高保真系统，都会有不同于 CFRP、抛光木材或皮革的个性。从某种程度上来讲，这是因为产品已经获取了材料的部分美学特性。

16.4.2　材料和心理：关联与感知

如此说来，材料一定具有美学特性，那么是否可以说材料一定有个性呢？乍一看，没有。材料只有在用于产品时才会获取个性。就像一名演员，依赖于不同的角色要求，他/她可以有许多不同的个性。用于上等家具的木料使人联想到精工细作，而当用于装运货物的箱子时，仅仅是廉价实用。玻璃在用作照相机透镜时，会与精密工程相关联，但用于啤酒瓶时，只是不可回收的包装。即便是经常与财富和权力相关联的黄金，当用于微电路时，其关联也变成了技术功能。

但是等一等。图 16.7 所示的物体有其自身令人忧郁的关联。它看起来是由抛光的硬木制成。抛光硬木是这类东西的传统材料。如果让你做出选择，你很可能不会认为抛光硬木不合适。但是，假如我告诉你它是由聚苯乙烯泡沫制成的，你的感觉还会一样吗？或许瞬间，它变成了一个垃圾箱，或者一个废纸篓，不适用于其高贵的目的。这么看来，材料确实具有个性。



图 16.7　棺材（木料让人感觉忧郁及仪式性，因而被认为适用于该产品，塑料则不合适。）

想一想木料，它是一种天然材料，其纹理具有其他材料所不具备的表面特性、类型、色彩和感觉。这是可触摸的——它摸起来比其他任何材料更暖和，且似乎更软。它与独特的声音和味道相关联，与传统的手工艺关联密切。任意两片木料都是完全不一样的。木工根据他所需要的纹理和质地来选择木料。木料可以提升价值。非常便宜的汽车内饰件是塑料的，昂贵汽车的内饰件材料是胡桃木和牛皮。并且，木料随着时间的推移获取了额外的特性，通常古老的木制品比新的木制品更有价值。这已不仅仅是美学问题，更有源于设计师的个性养成。

现在来看一下金属。金属是冷的，干净且精密。敲击时，会发出清脆的声音；抛光后，它们能反射光。经切削加工后的金属看上去很牢固，这是它在工程设计中最常被联想到的特性，因而人们接受并且信赖金属。金属与稳健、可靠及永恒相关联。它们的强度使其可用于细长结构，如火车站的大教堂式场所或桥的拉索。它们可变成流线型（如丝网制品），或铸成具有精美、复杂细节的实心形状。人类与金属的历史密切关联，“青铜时代”和“铁器时代”诉说着这些金属曾经是多么的重要。金属那些清晰定义的特性也常被用来描述人类的品质，如钢铁般的意志、银铃般的声音、金手指以及灌铅般的容貌。此外，金属与木料一样，经久耐用。当铜雕像、白蜡马克杯和铅屋顶的表面长出薄薄一层绿锈时，感觉比新近抛光的时候更具有吸引力。

那么，陶瓷或玻璃又是怎样呢？它们拥有格外悠久的历史——想象一下希腊陶器

和古罗马玻璃。它们几乎可以上任意色彩，并且以其抗刮擦、耐磨损、抗褪色和耐腐蚀能力而闻名世界，唯一的缺点就是易碎。陶瓷和玻璃曾经是手工业的常用材料。在某一时期，威尼斯玻璃器皿、迈森瓷器和韦奇伍德陶瓷甚至比银的价值还要高。同时，陶瓷和玻璃又是坚固且具有功能性的材料（如啤酒瓶）。玻璃的透明性赋予其瞬间的特性，有时能看见，有时又看不见。它能传播、折射和反射光。如今的陶瓷与高科技产品有了更多的关联，如厨房炉面、高压/高温阀、航天飞机散热瓦片，这些都是材料在极端条件下的应用。

最后，我们来看一下聚合物。“一个便宜的塑料仿制品”是聚合物过去坏名声的一个经典写照，久久不能被人们所遗忘。之所以会有这种说法，是源于早期人们利用塑料来仿制日本手工陶器的色彩与光泽。这类陶器当时在欧洲非常受欢迎。商品聚合物很便宜，可以很容易地上色，并且模压成型（这就是为何人们称其为塑料），因而制造仿制品很容易。不同于陶瓷，聚合物的表面易刮擦，也很容易褪色，使其无法长时间的完好保存。现在你了解了聚合物坏名声的由来，但是你觉得这样公平吗？没有任何一种其他材料拥有聚合物如此之多的特性。着色后，它们看起来像陶瓷；印染后，它们看起来像木料或织物；金属化后，它们看上去和金属完全一样。它们可以像玻璃一样透明，像铅一样完全不透明，也可以像橡胶一样柔韧，当加以强化后可以像铝一样坚硬。

塑料可用于仿制首饰中的宝石、水杯和玻璃窗的玻璃、柜台面的木料、衣服上的绒和毛皮，甚至是草。除了如此变色龙般的特性，塑料也有其特定的个性。它摸上去比金属或者玻璃要来得暖和，适应性强，特别适用于色彩明亮、轻松诙谐的设计。然而，它们的廉价在带来众多好处的同时也带来了问题。我们的街道、乡村和河道内到处都是废弃的塑料包装，极其难降解。

材料、工艺、适用性以及个性的组合创造了产品的特性，其作用的方式取决于特定的背景情况或心境。接下来，我们通过案例来加以描述。我们先来看图16.8给出的第一个案例。图中左侧的灯是为办公室所做的设计。它棱角分明、功能强大，呈亮灰色，且较重。它的形状与颜色与电脑控制台和键盘遥相呼应，让人联想到同时代的办公室技术。它的形状和重量散发着稳定、稳健、高效以及对办公场所而非卧室任务的适宜性理念。材料和工艺可用来强化这些关联和感知。涂瓷漆相框由钢板压制卷边而成，基本重量是铸铁，其反射物是不锈钢，被嵌在高强度的ABS外壳里。

图16.8右侧的灯与左侧的灯具有相同的技术评价，以及相同的功能性和适用性。但相似之处仅此而已。这款产品不是为忙碌的总经理所设计，而是为儿童或那些具有童心的成人所设计，会被放置在游戏室或卧室中使用。它具有弯曲的轮廓和相对半透明的颜色，并且很轻。它由半透明或不透明的彩色丙烯酸塑料制成，一旦点亮从外面看起来就像一盏

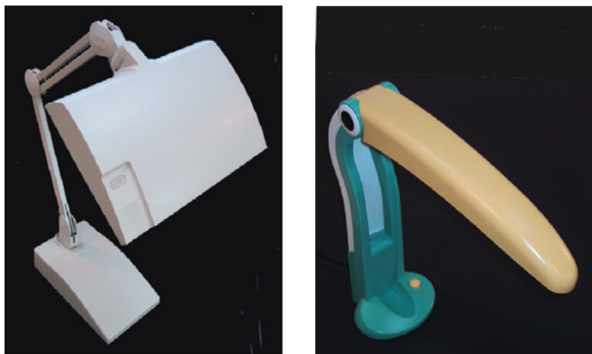


图16.8　灯（具有相同的技术评价，但个性完全不同。材料、工艺、形状、重量和颜色均与个性相关。）

霓虹灯。它的形状部分源于自然界，部分源于卡通和连环漫画，赋予其轻松愉快的特性。我觉得它好玩、有趣、令人愉悦且灵巧，但同时也是怪诞且易被破坏的。或许你对它的感觉完全不一样，因为感觉因人而异，取决于你来自何处。有经验的设计者会通过操控感觉来吸引那些他们想要吸引的群体。

图 16.9 给出的是第二个例子，对应家庭娱乐系统两种截然不同的呈现方式。左侧的组合音响主要面向那些专业人士，他们有着可支配的收入且迷恋高科技，以及那些只求最好的人士。直线状的外形，正方形、圆形、圆柱形以及圆锥形这类基本实体的使用，以及哑光银和黑的色彩无不显示着该产品是经过设计的。布局匀称的几何造型和成品表面让人联想到精密仪器、望远镜和电子显微镜，形状则让人想起风琴管（由此产生了与音乐及文化的关联）。总体给人的感觉是这里面有很多高尖端的技术，体现出一种不同凡响的品位。形状带给人的联想和感知还有很多，材料亦是如此。拉丝铝、不锈钢以及黑搪瓷，这些材料显然不会用在玩具上。



图 16.9 消费类电子产品（左右两侧的产品适用于不同的消费群体。每一类产品都塑造了其个性（美学、关联及感知的组合）以吸引目标群体。材料在塑造个性方面起核心作用。）

图 16.9 右侧给出的是另一种电子流行音乐的呈现方式。这是一家公司的产品，其产品外貌一直以来都没有发生变化。50 年前，我所拥有的一款收音机的外形与图片中的收音机基本一样。但即便如此，这家公司仍保留了一定的市场份额，甚至份额还在扩大。那么这款产品的背景情况是怎样的呢？很显然，家居用。它的消费群体或许是那些不喜欢现代科技的人群，或者是那些简单地觉得它与家庭环境相匹配的人群。每款收音机的形状都很简单，颜色柔和，触摸起来软而暖和。这些产品由六种甚至更多色彩的绒面革或皮革包裹而成。使用的材料不同，所带来的感觉也不同。形状与材料的组合使得产品与舒适的家具、皮质钱包和手提包，以及往事取得了关联，同时让人感知到其中的扎实技艺、可靠性和复古潮流，从而产生了这种传统而耐用的设计。

因此，在材料被制成可识别的形状之前，材料中已经隐含了一种特性，一种内在的个性。它有那么一点点害羞，不总是那么明显，甚至很容易被隐藏或掩盖，但一旦被适当处理，它就会被叠加到设计中。正是因为这种原因，很多材料都与特定的设计风格紧密联系在一起。风格是对有着相同美学、关联和感知的设计方法的简略表达。早期工业的风格信奉工业革命的一些技术，利用铸铁和钢并加以精心装饰使其呈现一种历史面貌。1860 年到 1910 年的工艺美术运动抛弃了上述方式，而是选用天然材料和织物来打造具有传统手工业特征的产品。相对而言，新艺术运动（1890—1918）更多地运用锻铁与铸铜的流体形状和耐久性、硬木的温暖与质地，以及玻璃的透明性来创造具有流动和有机特征的产品。Art Deco（1918—1935）演变自 19 世纪末的新艺术运

动，扩展了材料的范围，第一次引入了塑料（酚醛树脂和铸塑酚醛塑料），不仅用于生产富人的奢侈品，也用于生产大众市场的批量化产品。包豪斯学派（1919-1933）运用镀铬钢管、玻璃以及模压胶合板清晰地表达了他们的简约主义特色。波普艺术风格（1940-1960）以肆意打破旧习的特色而著称，在那个时期塑料才真正被大量用于产品设计。自那以后，材料的范围在持续地扩大，并且在塑造产品特性方面发挥着重要的作用。

16.5 本章小结

当代产品设计的核心就是满意度。通过整合好的技术以提供功能性，在界面设计方面合理地考虑用户需求，结合富有想象力的工业设计，我们就能创造出令目标消费群体满意的产品。

材料在这整个过程中发挥着核心作用。功能性依赖于合适的材料与工艺的选择，从而安全、经济地满足设计的技术要求。适用性依赖于材料的视觉和触觉属性，从而向用户传递信息和反馈。最为重要的是，产品的美学、关联以及感知都受到材料与工艺选择的影响。产品所被激发的个性，或多或少都反应了材料自身的个性。

消费者在购买产品时，所追求的远不仅仅是功能。对于发达国家的成熟市场，耐用消费品已经成为过去式。对于设计者而言，挑战不仅仅在于满足功能需求，还在于满足美学和情感需求。产品必须承载影像并且传达消费者所寻求的含义。或许是典雅，抑或是活泼新颖。一个日本制造商看得很远，他认为：要求将替代需要成为设计的动力。

或许，并非所有人都会接受这样一个观点。所以，我们以本章开头所用的话语来结束本章节。好的设计会起作用，优秀的设计同时使人愉悦。这些都源自于对材料富有想象力的使用。

如果对本章内容感兴趣，想要了解更多内容的话，请参阅扩展阅读列表中的第一本书籍。

16.6 扩展阅读

1）Ashby，M. F.，& Johnson，K.（2010）. *Materials and design—the art and science of materials selection in product design*（2nd ed.）. Butterworth-Heinemann，ISBN 0-7506-5554-2.

本章概述的一些想法在本书中做了进一步阐述。

2）Clark，P.，& Freeman，J.（2000）. *Design*，*a crash course*. The Ivy Press Ltd，Watson-Guptil Publications，BPI Communications，ISBN 0-8230-0983-1.

一本有意思的关于公元前5000年到今天的关于产品设计历史的书籍。

3）Dormer，P.（1993）. *Design since* 1945. Thames and Hudson，ISBN 0-500-20269-9.

一本包含插图且便宜的平装本，记录了工业设计在家具、器皿和纺织品方面的影响，是现代设计的发展史，突出了Haufe在1998年那本出版物中提及的发展史区间。

4）Forty，A.（1986）. *Objects of desire—design in society since* 1750. Thames and Hudson，ISBN 0-500-27412-6.

一份关于印花布、国货、办公设备以及运输系统的令人耳目一新的调研表。本书对设计者不吝赞

美之词，并且关注在工业设计做了什么，而不是谁做了什么。黑白图稍令人失望，这些图大部分是19世纪末期或20世纪初期绘制，缺少现代风格设计。

5） Haufe，T.（1998）. *Design*，*a concise history*. Laurence King Publishing（originally in German），ISBN 1-85669-134-9.

一本便宜的平装本，或许是向学生或其他人介绍工业设计最好的一本书。简明、全面、清晰，并且布局清楚、图片质量很高。

6） Jordan，P. S.（2000）. *Designing pleasurable products*. Taylor and Francis，ISBN 0-748-40844-4.

Jordan 是 Aesthetic Research at Philips Design 的总经理，认为今天的产品必须有合适的功能、可用且能带来愉悦。书中大部分内容是对市场调查方法的描述，用以引出用户对产品的反应。

7） Julier，G.（1993）. *Encyclopedia of 20th-century design and designers*. Thames and Hudson，ISBN 0-500-20261-3.

关于设计历史的简要总结，图片质量很好，并且有很多关于产品设计演化的讨论。

8） Manzini，E.（1989）. *The material of invention*. The Design Council，ISBN 0-85072-247-0.

有趣地描述了材料在设计和发明中的作用。意大利人的翻译给出了很多有趣且鼓舞人心的评注和词汇，这些词汇在关于材料的传统著作中很少能看到。

9） McDermott，C.（1999）. *The product book*. D & AD in association with Rotovison.

来自于受尊敬的设计师们的50篇短文，描述了他们关于设计的定义、他们各自公司的职位以及他们进行产品设计的方法。

10） Norman，D. A.（1988）. *The design of everyday things*. Doubleday，ISBN 0-385-26774-6.

一本特别注重产品设计中人类工程学和简易操作性的书籍。

第 17 章

革新的动力



图 17.0 变化

17.1 引言

假如没有革新的动力，所有事物都将停滞不前。图 1.1 向我们传递了一个信息，即现在事物的发展远比过去的任何时候都要快。由此可见，我们所处的环境在不断发生着变化，从而带来了设计约束条件的变化，以及随之而来的材料与工艺选择的变化。

这些革新源自诸多动力。首先，是市场的拉动。市场对于材料的需求是更轻、更硬、更强、更韧、更便宜，以及对极端温度和环境的耐受能力，并能提供更强大的功能。随后，是科学的推动。好奇心驱使着来自高校、企业和政府机构实验室的材料专家们不断进行探索。还有一些来自大型项目的推动，如历史上的曼哈顿项目、核能发展、太空竞赛和各类国防项目。就当下而言，也许有人会想到替代能源技术，抑或是老化排水设施、道路、桥梁和航空设备的保养问题，抑或是恐怖势力的威胁。产品的小型化、多功能化已成为一种趋势。很多立法开始关注产品的安全性，最近的诉讼也越来越重视责任机制的建立。

本章剖析了革新的动力，以及这些驱动力推动材料及其应用发展的方向，详见

图 17.1。

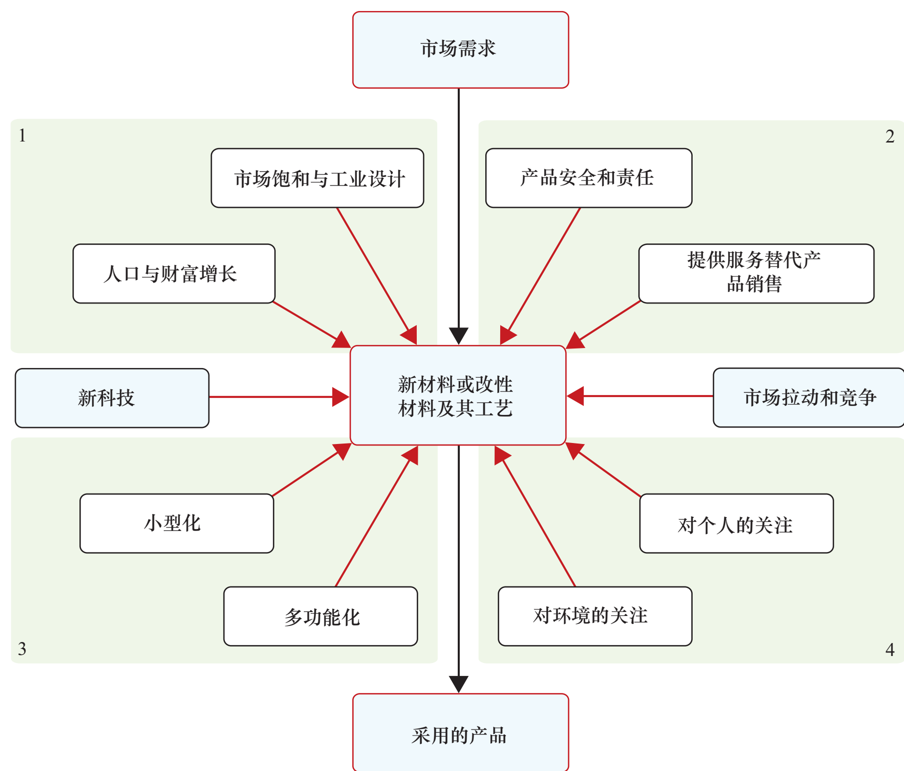


图 17.1 革新的动力（任何影响都在驱动材料与工艺选择的改变，激励新材料与工艺的开发。市场拉动和科学推动分别位于图中的最右侧和最左侧。）

17.2 市场拉动与科学推动

17.2.1 来自市场的动力和竞争

材料的终端用户是制造业。他们决定材料的选购，并调整设计以充分利用好所采购的材料。他们的决定源自于他们产品的特性。用于大型民用建筑（重量高达 100000t 甚至更多）的材料必须要便宜，经济性高于一切。相比之下，高科技产品（运动设备、军用硬件、太空项目和生物医学应用）的材料成本则不那么重要。以一个人工心脏瓣膜为例，材料成本几乎可以忽略不计。在这里，决定选材的是材料的性能，而非经济性。

产品的市场定价一般由几个因素决定。一是产品的材料成本。除此以外，还有研发成本、制造和市场推广的成本，还有与时尚、稀缺和缺乏竞争相关联的感知成本，以及第 13 章所描述的一些成本。当材料成本占市售价格的比例较高时（比如 50%），那么意味着产品的附加价值不高。这个时候，制造商会寻求节约材料的方式来增加利润或提高市场占有率。相反，当材料成本占市售价格的比例很小时（比如 1%），制造商则会不计材料成本，而选取最能提升产品性能的材料。

基于上述背景，我们来看一下图 17.2 和图 17.3。两张图的纵坐标分别对应单位质量的材料价格和单位质量的产品价格，由此可以在同一度量下对材料和产品进行比较。这里所给出的价格度量是个粗略的值，但其优点在于一目了然、易于确定，且能够反应与附加值之间的关系。产品单价只是其所用材料单价两到三倍的产品，属于材料密集型产品，对材料的成本比较敏感。如果产品的单价是其材料单价的 100 倍，那么这类产品对材料成本不敏感，属于性能驱动型产品，而非成本驱动型产品。虽然隐形眼镜和玻璃瓶几乎是由相同的玻璃制成，但一副隐形眼镜的单价是玻璃瓶的 10^5 倍。同样，人工心脏瓣膜和塑料瓶都是由聚乙烯制成，但两者的花费相差 10^5 倍。很显然，这里面有许多影响价格的因素需要我们去挖掘。

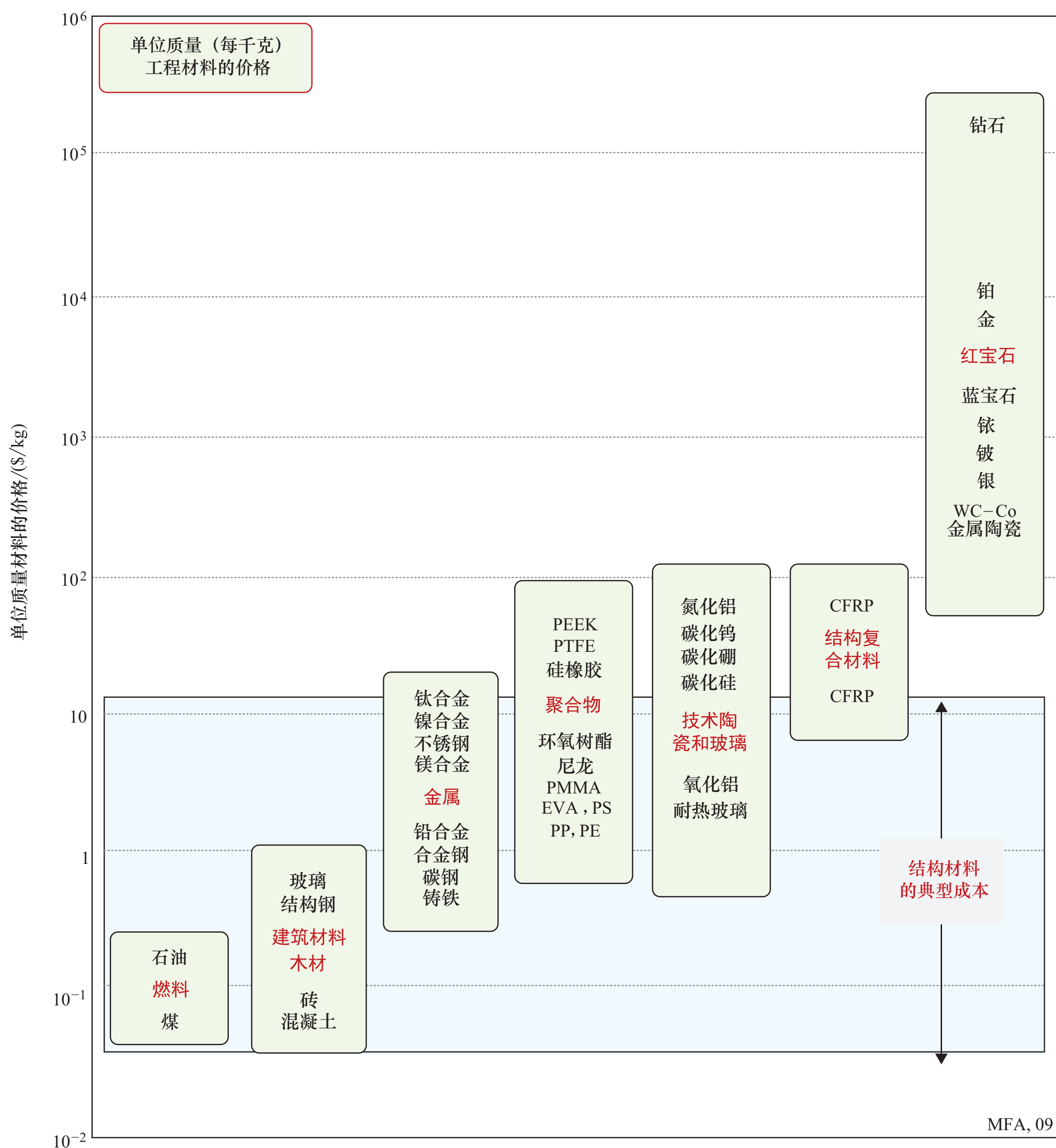


图 17.2 单位质量的材料价格（阴影带对应最常用的加工材料和建筑材料所处的价格区间。）

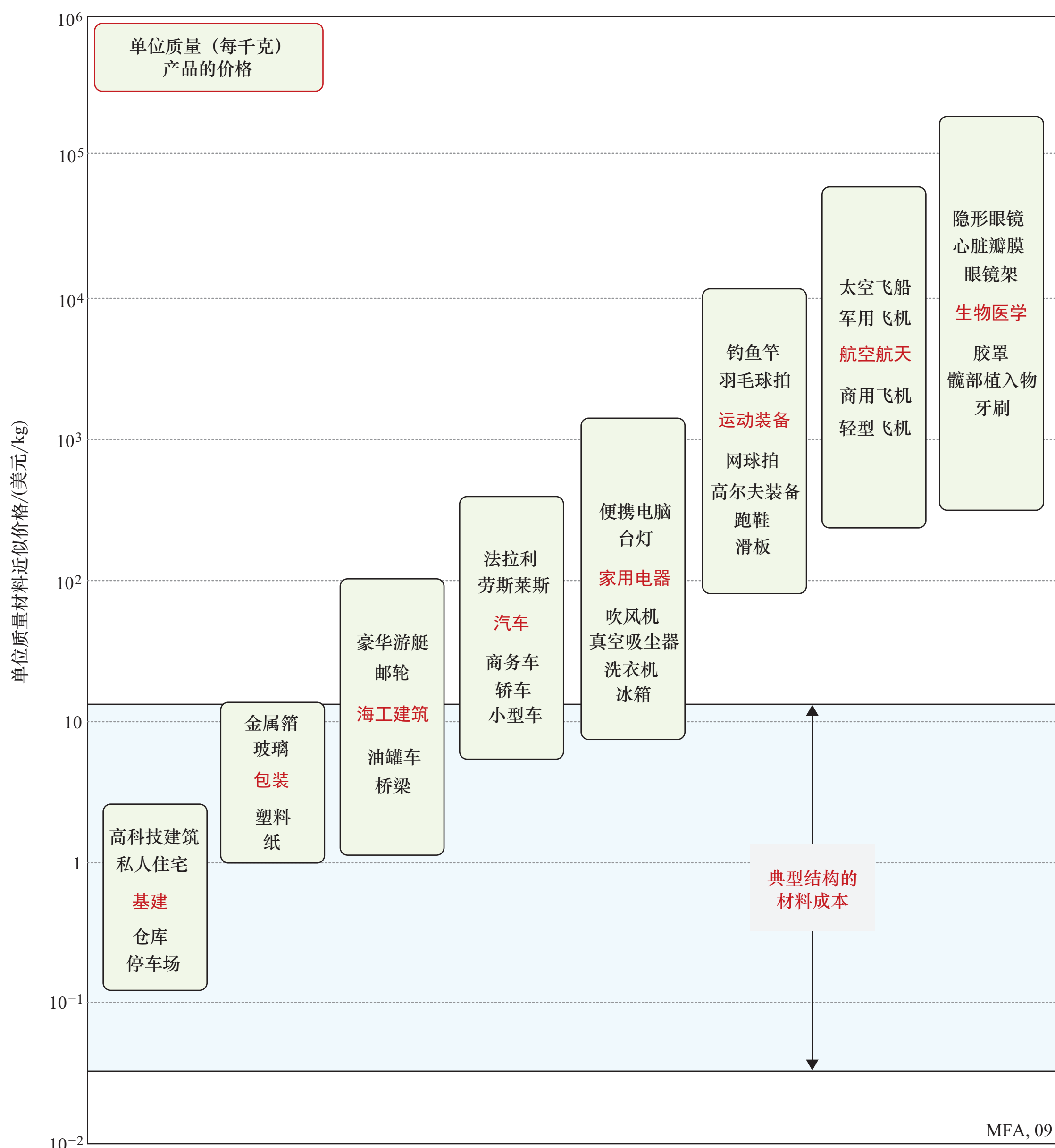


图 17.3 单位质量的产品价格（阴影带对应产品最常用的材料所处的价格区间。阴影带内的产品对材料成本敏感，而上方的产品对材料成本则不敏感。）

我们先来看一下单位质量的材料价格（见图 17.2）。大量商用建筑材料与加工材料都位于阴影带内，它们的成本介于每千克 0.05 美元到 20 美元之间。混凝土、砖、木材和结构钢等建筑材料位于阴影带的底部，而钛合金等高科技材料则位于阴影带的顶部。聚合物跨越的价格区间基本类似，其中聚乙烯（PE）位于底部，聚四氟乙烯（PTFE）在顶部。复合材料所处的价格区间相对高一些，其中 GFRP 位于区间底部，CFRP 位于区间顶部。目前，工程陶瓷所处的价格区间仍旧较高，但是随着产量的提升这种状况正在慢慢改善。只有少量“异乎寻常的”材料处于远高于阴影带的位置。

图 17.3 给出的产品单价呈现出一种不同的分布。图中给出了八个市场板块，几乎

覆盖所有的制造业。阴影部分对应商用材料的成本区间，与图 17.2 中的阴影带几乎一致。位于阴影带内的板块及其产品都有一个共同的特征，即材料成本在产品价格中所占比例很大。对于民用建筑、大型海洋结构以及消费包装，这个比例约为 50%。当产品所处的位置在阴影带顶部时，这个比例值下降至 20%左右。例如家用车，材料成本在产品价格中所占的比例约为 25%。在这些板块内，从材料转变为产品所产生的附加值相对较低，但其市场容量很大。这些约束限制我们所选出的材料必须以尽可能低的价格来满足相应的性能需求。因此，这些关联市场板块会内生改善传统材料加工工艺的动力，以实现在不损失性能的前提下降低成本，或者在不增加成本的前提下提高产品可靠性的目的。对于这些市场板块，在现有材料基础上的逐步改进远比革命性的研究发现来得更为重要。在钢材、精密加工方法或润滑技术方面取得的细微改进，很容易被市场所吸收和使用。

图中上半部分的产品在技术层面上较为复杂，通常材料单价占其产品单价的比例不到 10%，有些时候甚至低于 1%。由此可见，这类产品在制造过程中所产生的附加值很高，其竞争力与性能紧密相关。这些市场板块的设计师们在选材时有着很大的自由度，并且更倾向于选择具有显著性能的材料。市场的拉动在这里主要针对性能的需求，成本只是第二位的。小批量高附加值的需求更是推动了新材料或高性能材料的发展，要求材料更轻、更硬、更强、更韧，或者热膨胀更小，或者导电性更好，或者同时囊括上述所有性能。

图中这些市场板块按递增方式作了排序，那么问题来了：横坐标对应的是什么呢？这里面包含了许多信息，其中一种被认为是“信息容量”。相比于玻璃杯或塑料瓶，隐形镜片和人工心脏瓣膜的制造所涵盖的技术知识显然要高得多。左侧的市场板块对于所用材料的需求较低，而右侧的市场板块则将材料用至极致，与此同时还要求最佳的可靠性，使得这些板块呈现信息密集型特征。除此以外，还包含其他因素，如市场规模、竞争力（或者缺乏竞争力）、感知价值、广告、时尚和品位。基于这个原因，这张图不宜过度解读，它有助于形成信息体系，但不是一个量化工具。

即便在经济衰退时期，出于政府部门的利益，制造业仍会获得大量的资源以支撑政府部门的需求。但归根结底，市场拉动是最强有力的革新动力。

17.2.2 新的科学点：好奇心驱动的研究

好奇也许会害死猫，但是好奇是创新工程的氧气。技术发达的国家通常采用资助高校、政府实验室和工业研究实验室这三类机构的研究工作来确保新想法的传播。这些机构的部分科学家和工程师会被鼓励去研究一些短期没有经济效益，但或许在未来几十年内有所发展的材料和制造技术。很多现有的商用材料都是这么发展起来的。在拿破仑三世时期，铝是科学上的一项奇迹。为此，拿破仑花了远高于银匙价格的费用订制了一套铝匙。近年来出现的钛，也有类似的发展历史。现在广泛用于变压器和录音磁头的非晶态合金，在很长一段时间内只是停留在学术研究阶段。半导体和超导体的出现并非源于市场动力，而是源于长期的出于好奇心的研究工作，并因此诞生了两届诺贝尔奖。聚乙烯是化学家在研究化学反应的压力效应时发现的产物，而非跨国公司销售部门或市场部门的发现。历史上有很多源于个人好奇心的驱使而发展起来的材料和工艺的案例。

作为基础研究的产物，新材料还在不断涌现出来。有些已经进入商业化应用，有

些新材料的潜在应用还不是很清晰。无论如何，新材料的出现提供了创新的机会，甚至有的创造了新的市场。

单片陶瓷现在已处于商业化量产的阶段。它具有硬度高、化学稳定性好和耐磨损的特性，且具有抗极端温度的能力。目前，单片陶瓷在微电路基片方面的应用已经相当成熟，在耐磨损应用领域的使用还在不断发展，在高温发动机中的应用则在不断探索中。对于复合材料而言，目前开发的重点正在转向高温承重方面。对于这一点，金属基复合材料（如，碳化硅颗粒或纤维增强铝基复合材料）和金属间化合物基复合材料（如，铝化钛/碳化硅或二硅化钼/碳化硅）可以满足要求。尽管陶瓷基复合材料（如，氧化铝-碳化硅纤维）非常脆，但借助新的设计技术，这类材料或许也能胜任高温承重的应用需求。相比于基材，泡沫金属的密度只有基材密度的10%，因而可用于轻质高强的夹层结构，其性能可与复合材料相媲美。气凝胶是一种密度极低的泡沫，具有超低的导热系数。

新的生物材料，在植入人体后其结构能与人体组织有机融合，无排异性。新的聚合物，可在350℃的高温下使用，使得一些应用（如汽车发动机的进气歧管）中的金属可以用塑料来代替。新的弹性体，拥有柔性的同时还有很好的强度和韧性，可用于高性能密封件、弹性铰链和弹性覆层。功能梯度材料的制造技术可以通过定制零件的成分与结构，来实现外表面耐磨、心部韧性好，且内表面硬度高的特性。纳米材料可以实现特殊的力学性能、电学性能、磁性能以及光学性能。智能材料可以感知并汇报它们的状况（基于内置传感器），从而能提高使用的安全边际。自愈材料可以在没有人工干预的情况下进行自我损伤修复。

快速成型技术的发展，使得单一复杂零件的快速无模制造成为可能，且覆盖的材料范围很广。微制造技术可用于实现微型机电系统（MEMS）。新的表面工程技术，可以通过合金化、涂层或表层热处理的方式，来实现表面改性从而增强零件性能。这些技术包括激光淬火、耐磨聚合物和陶瓷涂覆、离子溅射，以及类金刚石超硬碳薄膜的沉积。新的粘合剂可替代铆钉和定位焊，因而胶粘结汽车完全有可能出现。新的数学建模和工艺控制技术，使得制造过程中的成分与结构控制更为精确，利于降低成本，提高稳定性和安全性。

综上所述的这些材料以及技术均已实现，甚至还有很多未在这里列出。它们的出现，正在潜移默化地推动新产品的设计以及市售产品的再设计，从而提高产品的市场份额。因此，设计师们应时刻保持警觉，紧跟潮流。

17.3 人口与财富的增长和市场饱和

世界人口持续增长（见图17.1区域1），其中一部分人的财富也在持续的增长。富人们消费着更多的产品，随着财富的积累，他们提出的需求也日益增多。迄今为止，全球产品生产能力依然在快速增长，导致发达国家和发展中国家的产品市场都趋近饱和。如果你想要一个产品，如一部手机、一台冰箱或一辆车，你无需在商店里排长队，或者将自己列入一份等待名单。相反，热情的销售人员会帮助你在一系列价格相近的同类产品里挑选出你想要的产品。

这种情况带来了一定的后果。其一就是能源及材料资源的持续消耗。这已成为材

料选择变革的动力之一，在本书第 15 章我们对此作了详细阐述。另一方面，在一个饱和的市场中，设计师必须找到吸引消费者的新的途径。过去依赖于工程质量来销售产品的方式已无法适应市场，这种依赖已逐渐被工业设计所倡导的美学、关联以及感知所取代，从而影响着材料和工艺的选择（本书第 16 章的主题）。

17.4 产品责任和服务提供

现在的法律要求：如果一个产品有瑕疵，则必须被召回并加以修复（见图 17.1 区域 2）。产品召回的成本极高，且有损公司形象。当产品在图 17.3 中所处的位置越高时，瑕疵引起的后果越是灾难性的。试想一下，你购买了一盒圆珠笔（共六支），如果其中一支无法正常书写，你会觉得没什么大碍。1/6 的概率在高斯分布中对应一个标准差或“1-西格玛”。那么，你愿意乘坐一架按“1-西格玛”标准设计的飞机吗？现今那些安全苛求系统都是基于“6-西格玛”的稳定性评级来设计的，也就是说，零件或部件的失效概率低于百万分之三。

这对材料的生产和加工方式产生了极大的影响。稳定性和可重现性依赖于复杂的工艺控制，并且每个生产环节都需要加以监控和查验。纯净钢（钢中夹杂被极度减少）、严格控制成分的铝合金、工艺控制的实时反馈、无损检测以及随机抽检，都有助于质量控制。

迫于对其产品承担终身责任的压力，制造商们将产品的保养和更换工作从消费者手中接管了过来，转由自己来完成。通过这种方法，它们可以监控产品的使用情况，以便在产品可修复和可调配的最佳状态下，而不是在破旧不堪的状况下将原始产品取回并加以替换。因此，制造商此时不再只是出售一件产品，而是出售一种服务。同许多学校一样，我们学校有很多打印机，但这些打印机的所有权都不是我们学校。取而代之的是，我们与供应商之间签有一份协议，确保一定的复印服务。

这种销售模式使得复印机设计师需要考虑的边界条件发生了变化。设计目标不再是以最低的价格构建一台拥有最多功能的复印机，而是构建一台长周期内单页复印成本最低的复印机。由此带来的结果是，设计的优先级转为更换、修复的便捷性，以及不同型号间材料与零件的标准化。最好的复印机不再是最耐用的，而是对于制造商而言检修、升级和更换成本最低的复印机。这并非一个特例。航空发动机制造商现在也开始采用“保修合同”的策略。这种策略与复印机制造商的策略是相同的，即制造商拥有发动机，监测发动机的使用情况，并在成本、可靠性以及可供功率容量三者的最优平衡点进行发动机的更换。

还有一些革新动力源自于法律法规的规定。现在，制造商必须对产品中包含的或产品制造过程中所使用的受限物质进行登记。一旦某一物质超出了阈值，那就必须被替换掉。这份受限物质列表包含金属铬、铅和汞，以及大量它们的混合物和化合物。它们中的很多都被用于材料的加工过程，因而这类限制不仅驱动选材的变化，对材料成形、连接和精饰方法也提出了更多的要求。

17.5 小型化和多功能化

如今，我们越来越多地在微观尺度应用精密机械工程（见图 17.3 区域 3）。CD 和

DVD 播放器的读磁头的定位精度在微米级。硬盘驱动器更为让人印象深刻，需要在几个平方毫米的区域内进行十亿字节信息的存储和检索。MEMS 常用于触发安全气囊的加速计，其工作原理是：在急停情况下，厚度为微米级的悬臂梁会在惯性力的作用下发生弯曲变形。MEMS 技术所能实现的功能远不止这些。现在已经有一款投影仪，它的工作原理不是将光投射到液晶板上，而是通过静电驱动反射镜阵列来反射光，从而获得更高的光强。每块反射镜的尺寸也就是几个微米大小。现在甚至还有针对在微处理器中使用双稳态开关的研究，这种技术用于信息处理时可与半导体开关相媲美。

设备所用的零件越小，所能集成的功能就越多。我们在第 8 章 8.6 节中提到过，手机、PDAs、MP3 播放器以及便携式计算机的尺寸都越来越小，都可以装入夹克衫口袋里。这些产品都包含很多功能零件，有保护元件、定位元件、激励元件、检测元件、外壳、硬盘、键盘，以及热冲击保护元件。显然，微工程学已经不再是瑞士手表的专用名词，我们在日常工作中接触到的几乎所有设备都有涉及相关技术。

小型化对材料提出了新的需求。随着设备的小型化，力学失效成为设计所面临的限制条件之一。以往，设计师在设计外壳、连接器、键盘、发动机和驱动器的许用尺寸和质量时，都会给这类零件的弯曲刚度、强度、磨损率和腐蚀率留有足够的安全边际。但是，这些物理量与尺寸并不呈现线性关系。假定特征长度为 L，那么弯曲刚度的数量级为 L^3 或 L^4，强度的数量级为 L^2 或 L^3，以单位时间截面损失分数来衡量磨损率的话，其数量级为 $1/L$。因此，设备尺寸越小，对于所用材料的要求也就越高。

上面讲述的是坏的一面，当然也有好的一面。那就是设备越小，需要使用的材料越少。而且，消费者愿意花费更多钱来购买尺寸更小而功能更强的设备。由此所带来的结果就是，那些不适合大型商品的昂贵的高性能材料，可以用于新一代小型化产品。试想一下安全气囊装置上的电枢，质量约为 1mg。对于 1mg 的任意材料，即便是金，在其原始状态成本也是极低的。

因此，材料成本已不再是一个限制条件，反而加工方式成了主要的限制因素。如何在微小尺度下制造精密零件，成为材料加工领域新的挑战。瑞士钟表匠通过进一步完善工具来实现上述需求，但是机械手表市场仍然受到了电子手表的极大冲击。新形态的小型化产品要求低成本的批量化生产，显然瑞士钟表匠的方法无法满足这一点。另一方面，微处理器制造商早已在非机械系统中成功实现了比例缩小。他们的微加工技术可用于制造微型机械装置。但是，微加工技术的使用意味着可选材料清单被大幅缩减。以这些加工工艺现在的形式，它们能用于加工硅、二氧化硅、氮化物和碳化物、铜和金的金属薄膜，但仅此而已。大型工程的主流材料，如碳钢、合金钢、铝合金、聚烯烃和玻璃等都不适用。当下的挑战是如何扩大微加工工艺的范畴，从而使更多的材料适用于这种加工方式。

17.6 关注环境与个人

我们生活在一个经济高速发展的时代。化石燃料能源给发达国家带来了优越的生活，使他们变得富有。因此，向往同样生活和财富的许多人口稠密的国家，也想很好利用这些能源。然而时代在发展，燃烧含碳量高的燃料不再能满足当下的能源需求。即便可以满足能源需求，它给自然环境所带来的负担也会迫使我们加以限制（见图

17.1 区域 4）。本书第 15 章给出了针对这个问题的短期解决措施，以及材料选择可能引发的一些结果。为实现长期可持续发展，我们需要做出更为深远的改变，包括我们加工、运输以及生活的方式，其核心在于改变我们使用材料的方式。

有一点需要指出，这种推动是强有力的，但另一方面我们无法预知这种改变会带来些什么变化。或许燃料电池、生物能源和安全核能是我们前进的方向，但就其意义而言，这些也都是短期解决方案。第 15 章引言中讲到，随着每年全球人口 3%的增长率，我们在未来 25 年里开采、加工和消耗的资源甚至比人类整个工业历史所使用的资源还多。那么，在全球人口每年增长 3%，经济增长每年 2%～20%这样一个背景下，怎样才能在满足人们生活期望的同时，将能源与材料的消耗控制在零增长甚至是负增长的水平？对此，我们依然没有答案。

财富会起到另外一种推动。如今，人们对于延寿的需求在持续增长，促使更多的资源被用于健康医疗事业。人体中极大部分的器官都承担着明确的功能，如牙齿用于咀嚼、骨骼用于承受结构载荷、关节用于确保咬合、心脏用于供血、动脉将血传送至肢体，以及皮肤用于柔性保护。随着年龄的增长和一些意外伤害的出现，其中的某个或者多个器官很容易出现功能障碍。由于这些功能都属于力学性能范畴，从理论上来说，它们是完全可以加以替换的。一种方法是使用真实的人体器官，但是需要的患者很多，并且存在伦理及其他方面的一些困难，驱使人们更多地发展人造替代物。如今，人造牙齿和骨头移植物、髋关节和膝关节替代品、人造动脉和皮肤，甚至是心脏都已被广泛使用。但是，到目前为止它们还非常昂贵，一定程度上限制了应用。就绝大部分而言，它们还仅是人体器官简陋的替代品。这里变革的动机是为所有类型的人造器官寻找合适的材料，让人们能负担得起。

研究表明：在一个老龄化社会，产品和服务的适用性莫名地困扰着人们，无论他们是年少或年老、健全或残障。一直到前不久，许多设计师还都是以青年消费者市场（15～35 岁的群体）为其业务的中流砥柱，导致所开发出来的产品无法被其他消费群体所接受。机敏的制造商察觉到了这点，并想方设法重新设计他们的产品和服务来迎合更为广大的客户群体。美国 OXO 公司就因此实现了厨具和园林工具每年 50%销售额的增长。英国 Tesco 公司通过去掉网站上那些巧妙但费解的图形，提供公司服务的快速下载通道以及简单直观的网站导航，由此增加了成千上万的网络消费者，覆盖各式各样的人群。包容性设计是一种强有力的作业模式，可以确保产品与服务满足尽可能多的消费者。当然，社会个案同样时有发生。如今很多人不愿意使用电子或其他类产品，原因在于他们无法理解这些产品的使用方式或者缺乏相应的技能。

所有产品都会有一部分用户被排除在外，有时这种排除在外是刻意为之，例如儿童安全用药瓶。但更多时候，这种排除在外是无意识和没有必要的。许多服务依赖于它们交付产品后的使用状况，因此不实用的产品会被用户所淘汰。录像机就是一个典型的例子。非常多的现代产品会将那些在视力、听力、移动能力、体力或精神方面有缺陷的消费者排除在外。对此，政府部门将抵制设计排斥放在很高的优先级，因而也越来越受到制造商的重视。这种思考会改变他们设计中选择的约束条件和目标，进而影响材料的选择。如今，材料的使用效果，如功能是否好控制、抓握是否舒适、是否绝热或是否会起到防护作用等已成为优先考虑的事项。

17.7 本章小结

强大的革新动力驱使着新材料和改良材料的开发，鼓舞着产品的更新换代，同时也在改变着人们生产和使用材料的方式。市场动力和军事特权是历史上最有影响力的两大因素，直到现在仍是最强劲的革新动力。此外，科学家的创新精神也在不断驱动变革。他们展示了大量具有潜在卓越性能的新材料，尽管开发及商业化这些材料还需要很长的时间。一般来说，实验室产品需要 15 年左右的时间才能为市场所接受。

今天，还有一些驱动力影响着材料的开发和使用。财富的增长打开了精密产品的市场空间。产品趋向尺寸更小、质量更轻和功能更为强大，因而对材料的性能提出了更高的要求。产品可靠性与安全性的极力强调，以及制造商需对产品故障或功能失效承担全部责任的压力，使得制造商越来越重视材料性能的一致性和工艺过程的严格控制。工业增长不断破坏着我们身处的自然环境，因而需要我们在选材时，以环境影响最小化为目标。很多产品被认为过于复杂导致难以使用，使得一部分用户被排除在外。这种观点驱使着我们对产品设计方式以及材料选择进行重新评估。

显然，昔日的名优产品在今日或许已不再是最优的产品。对于任何产品，总会留有余地，使设计师对其产品设计和材料选择做出新的评估。

17.8 扩展阅读

1）Defence and aerospace materials and structures. National Advisory Committee（NAC）Annual Report 2000. *www. iom3. org/foresight/nac/html.*

2）Ashby, M. F., Ferreira, P. J., & Schodek, D. L. （2009）. *Nanomaterials, nanotechnologies and design, an introduction for engineers and architects.* Butterworth-Heinemann, ISBN 978-0-7506-8149-0.

基于建筑视野看纳米材料。

3）Keates, S., & Clarkson, J. （2004）. *Countering design exclusion—An introduction to inclusive design*. Soringer-Verlag, ISBN 1-85233-769-9.

对于无意识排除的深入学习，并且给出了克服设计中无意识排除的方法。

4）Starke, E. A., & Williams, J. C. （1999）. Structural materials: Challenges and opportunities. *The Bridge*, 29（4）.

The Bridge 是美国国家工程院的一本期刊。这篇报告以及 Williams 写的报告可以在他们的网站上找到。

5）van Griethuysen, A. J. （Ed.）. （1987）. *New applications of materials.* Scientitic and Technical Publications Ltd, ISBN 0-951362-0-5.

荷兰人关于材料演化的书籍。

6）Williams, J. C.（1998）. Engineering competitive materials. *The Bridge*, 28（4）.

The Bridge 是美国国家工程院的一本期刊。Williams 博士在航空航天工业领域以及学术领域都有丰富的经验。

16种图谱 汇集金属、聚合物与泡沫、复合材料、陶瓷和天然材料性能的彩色图谱，数据准确

7 种 方 法 提供材料选择的基本原则与各类指标

48个案例 介绍不同产品的材料选择与制造工艺选择

材料设计 涵盖不同材料的设计方法、设计过程、设计工具

光盘内容

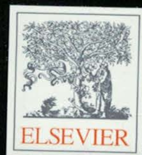
★ 金属，聚合物与泡沫，复合材料、陶瓷和天然材料及其应用

★ 各类材料的***18*** 种性能参数

★ ***15*** 种标准问题的可行解

★ 不同限制条件下零件质量的最小化设计

★ ***90*** 个例题





ISBN 978-7-111-57679-2
ISBN 978-7-89386-148-2(光盘)

策划编辑◎**孔劲** / 封面设计◎**张静**
编辑qq号：35482562
电话：010-88379772

本书译自原版**Color Atlas of Lacrimal Surgery.** 并由Elsevier授权出版



地址：北京市百万庄大街22号
邮政编码：100037
电话服务
服务咨询热线：010-88361066
读者购书热线：010-68326294
010-88379203
网络服务
机工官网：www.cmpbook.com
机工官博：weibo.com/cmp1952
金书网：www.golden-book.com
教育服务网：www.cmpedu.com
封面无防伪标均为盗版



机械工业出版社微信公众号



定价：189.00元(含1CD)